

Zur Optimierung der Meßtechnik und der Auswertemethodik bei Pfahlintegritätsprüfungen

Vom Fachbereich für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte
DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Bernd Pläßmann
aus Münster

Eingereicht am:	18.05.2001
Mündliche Prüfung am:	26.10.2001
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. R. Leutner
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. D. Dinkler
Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. H. Antes Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig entstanden.

Das Ziel der Arbeit ist die Darlegung und Optimierung der Aussage- und Anwendungsmöglichkeiten der dynamischen „low-strain“ Pfahlintegritätsprüfung auf Basis der Reflexionsmethode hinsichtlich der Meß- und Auswertemethodik.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz für die Möglichkeit dieses Forschungsthema zu bearbeiten und seine ständige Unterstützung mit zahlreichen Anregungen. Leider konnte er den Abschluß der Arbeit nicht mehr miterleben, da er am 11.04.2001 verstorben ist.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. H. Antes und Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Budelmann danke ich für die Übernahme der Berichterstattung. Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Leutner gilt mein Dank für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Dinkler für die Übernahme des Amtes eines Prüfers.

Bei der Durchführung und Auswertung der umfangreichen Untersuchungen waren mir Mitarbeiter und studentische Hilfskräfte behilflich. Ihnen allen sowie meinen ehemaligen Kollegen und Herrn Dr.-Ing. H. Elmer vom Curt-Risch-Institut der Universität Hannover danke ich für die wertvolle Unterstützung.

Nürnberg, im Januar 2002

Bernd Pläßmann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziele und Aufbau der Arbeit	2
2	Stand der Forschung	4
2.1	Schäden bei der Pfahlherstellung	4
2.2	Qualitätskontrolle von Pfahlgründungen	8
2.3	Methoden zur Ermittlung der Pfahlintegrität	10
3	Theoretische Grundlagen der Integritätsprüfung	25
3.1	Physikalische Grundlagen der Wellenausbreitung im Pfahl	25
3.2	Meßtechnische Erfassung der Wellenausbreitung im Pfahl	35
3.3	Simulation der Wellenausbreitung im Pfahl	38
3.3.1	Lösung der Bewegungsgleichung im Zeitbereich	41
3.3.2	Modalanalyse	43
4	Untersuchungen zum Meßverfahren der Integritätsprüfung	44
4.1	Entwicklung eines Meßsystems	44
4.2	Untersuchung der Impulseinleitung	48
4.3	Anforderungen an den Meßaufnehmer	54
4.4	Erweiterungen der Meßkette	58
4.4.1	Mögliche Meßaufnehmer	58
4.4.2	Entwicklung eines Meßaufnehmers auf DMS-Basis	59
5	Untersuchungen zur Erfassung von Pfahlfehlstellen	64
5.1	Versuchskonzept und Aufbau eines Versuchsstandes	64
5.2	Herstellung der Testpfähle	70
5.3	Meßdurchführung	72
5.4	Ergebnisse und Bewertung der Messungen sowie der Simulationsberechnungen	74
5.4.1	Änderung der mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit	74
5.4.1.1	Vorgehen zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeitsänderungen	75
5.4.1.2	Ermittelte Wellengeschwindigkeitsänderungen	79

5.4.1.3	Simulationsberechnungen zur Untersuchung der Wellengeschwindigkeitsänderungen	84
5.4.2	Quantifizierung der Fehlstellenausbildung	87
5.4.2.1	Vorgehen zur Bestimmung der Fehlstellenausbildung	88
5.4.2.2	Ergebnisse der Fehlstellenbestimmung	89
5.4.2.3	Simulationsberechnungen zur Bestimmung der Fehlstellenausbildung	94
5.4.3	Untersuchung weiterer Fehlstellentypen	98
5.4.3.1	Allmähliche Querschnittsverminderungen	98
5.4.3.2	Unsymmetrische Fehlstellen	101
5.4.3.3	Fehlstellenanzahl	102
5.4.4	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Fehlstellenauflösung	104
6	Untersuchung des Bodeneinflusses auf das Meßsignal	106
6.1	Einfluß der Dämpfungsverteilung auf die Wellenausbreitung	108
6.2	Untersuchung des Dämpfungsverhaltens anhand von Messungen	112
6.2.1	Testpfahlmessungen	112
6.2.2	Spannbeton-Fertigpfähle	114
6.2.3	Ortbeton-Rammpfähle	117
6.3	Zusammenfassung der Untersuchungen zum Bodeneinfluß	119
7	Untersuchungen zur Auswertung von Integritätsprüfungen	120
7.1	Möglichkeiten der Meßanalyse zur Interpretation des Zeitsignals	120
7.2	Untersuchung der Anwendung von Korrelationsalgorithmen	121
7.2.1	Grundlagen	121
7.2.2	Anwendungen in der Seismik	123
7.2.3	Anwendungsmöglichkeiten zur Auswertung von Integritätsprüfungen	124
7.2.4	Auswertung der Testpfahlmessungen mit Hilfe der Kreuzkorrelation	125
7.2.5	Weiterführende Anwendungsmöglichkeiten durch Variation der Impulseinleitung bei der Integritätsprüfung	131
7.2.6	Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten	134
7.3	Interpretation des Frequenzspektrums zur Auswertung von Integritätsmessungen	135
7.3.1	Anwendungsmöglichkeiten zur Auswertung der Integritätsprüfung	135
7.3.2	Auswertung der Testpfahlmessungen im Frequenzbereich	139

7.3.2	Bewertung der Auswertungsmöglichkeiten mit einer Frequenztransformation	144
7.4	Identifikationsberechnungen zur Auswertung von Integritätsmessungen	145
7.4.1	Einordnung der Meßsignalidentifikation	145
7.4.2	Entwicklung und Anwendung einer Meßsignalidentifikation	146
7.4.2.1	Identifikationsalgorithmus A	150
7.4.2.1	Identifikationsalgorithmus B	154
7.4.3	Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten	160
8	Zusammenfassung	162
9	Ausblick	165
10	Literaturverzeichnis	167
11	Synopsis	175

Erklärung der verwendeten Formelzeichen

A	Querschnittsfläche
B_{FS}	Fehlstellenbreite
c	Wellenausbreitungsgeschwindigkeit
c_D	Dehnwellengeschwindigkeit
c_S	Scherwellengeschwindigkeit
c_P	Kompressionswellengeschwindigkeit
C	Dämpfungsmatrix
D	Dämpfungsparameter
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
f	Frequenz
f_{Grenz}	Grenzfrequenz des Stoßimpulses
FS	Fehlerschranke
$\Phi_{xx}(\tau)$	Autokorrelationsfunktion
$\Phi_{xy}(\tau)$	Kreuzkorrelationsfunktion
K	Steifigkeitsmatrix
L, l	Länge
M	Massenmatrix
λ	Wellenlänge
λ_{Grenz}	Grenzwellenlänge des Stoßimpulses
N	Admittanz
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
T, t, τ	Zeit, Zeitdifferenz
t_c	Stoßimpulsdauer
u	Verschiebung
\dot{u}, v	Teilchengeschwindigkeit
\ddot{u}, a	Beschleunigung
Z	Impedanz

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Pfahlgründungen dienen zur Einleitung von Bauwerkslasten in tiefe, tragfähige Baugrundsichten. Bauwerksschädigende Setzungen können dadurch erheblich reduziert werden. Es gibt eine Vielzahl von gebräuchlichen Pfahltypen, wobei im Wesentlichen bodenverdrängende und bodenfördernde Pfahlsysteme unterschieden werden. Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach Art der Pfahleinbringung zwischen Ramm-, Bohr- und Vibrationspfählen. Je nachdem, ob ein Stahlbetonpfahl auf der Baustelle oder in einem Werk betoniert wird, unterscheidet man Ortbeton- und Fertigpfähle. Weiterhin existieren viele Sonderformen, wie z.B. Verpreßpfähle, Injektionspfähle, Betonrüttelsäulen und Hochdruckinjektionssäulen. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Pfahltypen sind in [12], [52], [81] zu finden.

Damit Pfähle die Bauwerkslasten aufnehmen können und sich ihnen nicht durch große Setzung entziehen, ist eine fehlerfreie Pfahlherstellung von entscheidender Bedeutung. Bei der großen Anzahl verschiedener Pfahltypen ist das Erscheinungsbild von möglichen Schadensausbildungen sehr unterschiedlich. Die verschiedenen Schadensausbildungen können in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens unterschiedlichen Ursachen zugeordnet werden. Um Pfahlschäden festzustellen, ist eine Qualitätskontrolle während und nach der Herstellung erforderlich. Im Hinblick auf die immer größer werdende Auslastung von Pfahlgründungen in Bezug auf die Tragfähigkeit gewinnt diese Kontrolle zunehmend an Bedeutung.

Bei der Qualitätskontrolle wird die Bestimmung der Pfahltragfähigkeit und der Pfahlintegrität unterschieden. Zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit werden statische und dynamische Prüfmethoden angewendet. In der vorliegenden Arbeit wird die Kontrolle der Pfahlintegrität betrachtet.

Zur Bestimmung der Pfahlintegrität stehen verschiedene Prüfmethoden zur Verfügung. Die verschiedenen Methoden haben unterschiedliche Bewertungsmöglichkeiten und Anwendungsgrenzen. Eine aussagekräftige und wirtschaftliche Methode, die in der vorliegenden Arbeit betrachtet wird, ist die dynamische „low-strain“ Pfahlintegritätsprüfung auf Basis der Reflexionsmethode. Hierbei wird die Stoßwellenausbreitung im Pfahl–Boden–System meßtechnisch erfaßt und zur Bewertung der Integrität herangezogen. Der Stoßimpuls wird mit einem speziellen Impulshammer geringer Masse in den Pfahlkopf eingeleitet. Die Ausbreitung der Stoßwelle bzw. die Wellenreflexionen werden durch die Messung mit einem Beschleunigungsaufnehmer an der Pfahlkopfoberfläche erfaßt. Eine gesicherte Anwendungsmöglichkeit der „low-strain“ Prüfmethode beschränkt sich auf Ramm- und Bohrpfähle.

Ursprünglich wurde die „low-strain“ Prüfmethode entwickelt, um die Pfahllänge anhand der Pfahlfußreflexion zu ermitteln. Durch die Weiterentwicklung des Verfahrens und der Auswertung des Meßsignals ist es möglich, daß zusätzlich auch Aussagen zur

Pfahlgeometrie gemacht werden können. Treten neben der Impedanzänderung am Pfahlfuß weitere Impedanzänderungen auf, d.h. Änderungen von Geometrie- oder Materialeigenschaften, entstehen zusätzliche Wellenreflexionen, die es ermöglichen, Fehlstellen, wie z.B. Einschnürungen oder Risse, entlang des Pfahlschafts zu erkennen. Aufgrund der Mehrdeutigkeit eines Meßsignals ist die Differenzierung der verschiedenen Ursachen eines Impedanzwechsels jedoch erschwert.

Die Standardauswertung besteht derzeit im wesentlichen aus der visuellen Beurteilung des zum Geschwindigkeitsverlauf integrierten Meßsignals. Die derzeitige Meß- und Auswertemethodik ermöglicht keine Bestimmung der genauen Fehlstellenausbildung. Die Aussagemöglichkeiten werden durch die Art der Impulseinleitung, durch die meßtechnische Erfassung der Pfahlkopfbeschleunigung, durch die vorhandenen Informationen über das Pfahl-Boden-System und die Auswertungsart eingeschränkt.

1.2 Ziele und Aufbau der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Aussage- und Anwendungsmöglichkeiten der dynamischen „low-strain“ Integritätsprüfung auf Basis der Reflexionsmethode hinsichtlich der Meß- und der Auswertemethodik untersucht, um die Beurteilungsmöglichkeiten der Pfahlintegrität zu optimieren.

Zur genauen meßtechnischen Erfassung der Wellenausbreitung werden die Anforderungen an ein Meßsystem festgelegt, um meßtechnische Störeinflüsse zu minimieren und die Komponenten des Meßsystems entsprechend des dynamischen Vorgangs wählen zu können. Hierzu wird ein spezielles Meßsystem entwickelt.

Von entscheidender Bedeutung für die Beurteilung der Pfahlintegrität anhand der Stoßwellenausbreitung ist die Anregung mit einem an die Meßaufgabe angepaßten Stoßimpuls. Um eine gezielte Vorgabe des Stoßimpulses für die weiteren Versuche definieren zu können, werden Messungen mit verschiedenen Impulseinleitungen an einem speziellen Modellpfahl durchgeführt.

Der eingeleitete Stoßimpuls bestimmt wesentlich die Aussagemöglichkeiten der Prüfmethode über eventuell vorhandene Pfahlfehlstellen. Die Zusammenhänge zwischen der Stoßimpulseinleitung und der möglichen Erfassung von Fehlstellen auch in Abhängigkeit des Bodeneinflusses wird anhand von umfangreichen Meßreihen an Testpfählen mit definierten Geometriefehlstellen aufgezeigt und abgegrenzt. Zur weiterführenden Analyse dieser Zusammenhänge dienen Simulationsberechnungen auf Basis der Finite-Element-Methode (FEM) mit dem Zeitintegrationsverfahren nach Newmark.

Als Symptom zur Detektion von Geometriefehlstellen werden bislang ausschließlich die am Pfahlkopf gemessenen Wellenreflexionen, die aus vorhandenen Fehlstellen resultieren, betrachtet. Dies ist für die Detektion kleiner Fehlstellen problematisch. Bei den Testpfahlmessungen wird die Änderung der mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit als zusätzliches Symptom untersucht. Dadurch wird auch die qualitative Erfassung kleiner

Fehlstellen ermöglicht. Durch Simulationsberechnungen werden die bei den Messungen gewonnenen Erkenntnisse bestätigt und können weiterführend analysiert werden.

Neben der Meßmethodik bestimmt die Art und Weise der Auswertung die Aussagemöglichkeiten der Prüfmethode. Aufbauend auf der Standardmeßanalyse im Zeitbereich wird hier erstmals für die Pfahlintegritätsprüfung die Anwendung von Korrelationsalgorithmen vorgestellt. Die Möglichkeiten der Meßanalyse im Frequenzbereich werden untersucht und bewertet.

Für eine möglichst exakte Auswertung müssen zusätzliche Informationen für die Beurteilung des Meßsignals herangezogen werden. Daher wird die Standardmeßkette zur Vergrößerung der meßtechnischen Informationen durch im Rahmen der Arbeit eigens entwickelte Meßaufnehmer in zusätzlichen Meßebenen erweitert und bei den Testpfahlmessungen eingesetzt.

Weitere Informationen zur Beurteilung des Meßsignals können zum einen aus der Pfahlherstellung bzw. aus dem Zusammenhang von Schadensursache und –ausbildung sowie zum anderen aus der Baugrunderkundung zur Einschätzung des Bodeneinflusses auf die Wellenausbreitung im Pfahl gewonnen werden. Die Untersuchung dieser beiden Einflußfaktoren wird durch Simulationsberechnungen ermöglicht und für ausgewählte in situ Messungen durchgeführt.

Zur Entwicklung eines Auswertalgorithmus, der eine quantitative Beurteilung der Pfahlintegrität realisiert, werden sämtliche gewonnenen Erkenntnisse genutzt, wie z.B. die Erkenntnisse über die auftretenden meßtechnischen Einflußfaktoren und die aus den Untersuchungen resultierenden Zusammenhänge zwischen der möglichen Erfassung von Fehlstellen und Stoßimpulseinleitung. Zur Berücksichtigung des Bodeneinflusses können hierbei entsprechend der Untersuchungsergebnisse die Baugrundinformationen zur Bestimmung eines Dämpfungsverlauf herangezogen werden. Verschiedene Vorgehensweisen der Auswertung durch eine parametrische Meßsignalidentifikation werden untersucht und bewertet. Die Identifikation beinhaltet eine Kopplung des FEM-Modells mit den untersuchten Korrelationsalgorithmen sowie der Anwendung von Fehlerschranken und der Fehlerquadratmethode. Die Anwendbarkeit des entwickelten Identifikationsalgorithmus wird anhand der Testpfahlmessungen gezeigt.

2 Stand der Forschung

2.1 Schäden bei der Pfahlherstellung

Bei der Pfahlherstellung können verschiedene Schadensausbildungen auftreten, die in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens unterschiedlichen Ursachen zugeordnet werden können. Um die zahlreichen Ursachen, die zu einer fehlerhaften Pfahlgründung führen können, einzugrenzen, bietet sich eine Einteilung in folgende drei Bereiche an:

- fehlende oder unzureichende Baugrunderkundung sowie deren Fehlinterpretation
- falscher Entwurf oder falsche Bemessung der Pfähle
- fehlerhafte Bauausführung.

Bei Schadensfällen sind häufig mehrere Ursachen gleichzeitig anzutreffen. Im folgenden wird ein kurzer Überblick möglicher Schadensursachen sowie Schadensausbildungen gegeben.

Baugrunderkundung

Zum Entwurf, zur Bemessung und Herstellung einer geeigneten Pfahlgründung bedarf es zunächst einer umfassenden Baugrunderkundung. Diese muß Aufschluß geben über Lage, Mächtigkeit, Abfolge und Beschaffenheit der anstehenden Bodenschichten im Einflußbereich der zu erstellenden Gründung. Weiterhin sind die Grundwasserleiter, die Grundwasserstände sowie die chemischen Zusammensetzungen des Grundwassers zu untersuchen. Häufig fällt die Baugrunderkundung aus Gründen der Kostenersparnis oder auf Grund von Zeitmangel zu dürtig oder unpräzise aus, so daß im Verlauf der Bauphase schwerwiegende Schäden auftreten können. Ein Beispiel hierfür ist in [97] beschrieben.

Entwurf und Bemessung

Der Entwurf und die Bemessung einer fachgerechten Pfahlgründung ist erst nach Einholen eines Baugrundgutachtens sinnvoll möglich. Entsprechend den vorhandenen Baugrundverhältnissen, den erforderlichen Pfahllängen und den örtlichen Gegebenheiten (vorhandene Bebauung, etc.) wird ein geeigneter Pfahltyp gewählt.

Dabei sind nicht nur die praktischen Herstellungsbedingungen, sondern auch wirtschaftliche Überlegungen zu berücksichtigen. Die gewählte Pfahlgründung sollte eine sichere Einleitung der Bauwerkslasten gewährleisten und dabei gleichzeitig möglichst geringe Kosten verursachen.

Nach Festlegung des Pfahltyps muß eine Bemessung entsprechend der Größe und Verteilung der angreifenden Kräfte unter Beachtung der maßgebenden Normen erfolgen. Grundsätzlich unterscheidet man bei der Bemessung von Einzelpfählen und Pfahlgruppen die innere, d.h. des Pfahlmaterials, und die äußere Tragfähigkeit, d.h. des Pfahl-Boden-Systems [81].

Wenn der Entwurf eine Gründung mit *Rammpfählen* vorsieht, müssen bei der Bemessung besondere Hinweise beachtet werden. Dazu gehören u.a. die Einhaltung von Mindestabständen sowie die Festlegung der Rammparameter wie Fallhöhe und Fallgewicht [34].

Probleme bei der *Pfahlrammung* entstehen häufig durch den Einsatz zu leichter Fallgewichte. Während der Trend beim Entwurf eher zu größeren Pfahllängen und -durchmessern geht, sind viele Unternehmen noch nicht mit entsprechend schwerem Rammgerät ausgestattet. Bei der Ausführung kommt es dann häufig zu Ramm Schäden aufgrund ungeeigneter Gerätschaften. Beispiele für derartige Schadensursachen sind in [38] beschrieben.

Fehler bei Entwurf und Bemessung treten nicht nur bei Rammpfählen, sondern auch bei *Bohrpfählen* auf. In [23] wird von Schäden durch zusätzliche Setzung aufgrund der falschen Dimensionierung des Bohrgerätes berichtet. Fehlende Betonüberdeckung der Pfahlbewehrung bei Ortbetonpfählen wird häufig durch die falsche Abstimmung zwischen Zuschlagstoffgrößtkorn und Abstand der Längsbewehrung verursacht [22].

Generell kann die Wahl eines *ungeeigneten Pfahltyps* für die vorhandenen Baugrundverhältnisse zu Schäden führen. Beispielsweise traten bei Herstellung von Rammpfählen [30] aufgrund zu großer Bodenverdrängung Hebungen der Nachbarbebauung auf, die zu Schäden führten.

Bauausführung

Die Ursache für eine fehlerhafte Pfahlgründung liegt zu etwa 40% in der Ausführung der geplanten Arbeiten [18]. Zur Ausführung gehört neben der eigentlichen Herstellung der Pfähle auf der Baustelle auch der Transport dorthin und die Vorfertigung, die bei den meisten Rammpfählen erforderlich ist. Bereits in dieser Phase kann es zu Beschädigungen der Pfähle oder zur Anlieferung ungeeigneten Materials, z.B. verbogener Bewehrungsstahl, zu steifer oder bereits abbindender Beton, kommen.

Ausschlaggebend für einen einwandfreien Arbeitsablauf und eine fachgerechte Herstellung sind eine zuverlässige und erfahrene Mannschaft, leistungsfähige und den Aufgaben angepasste Geräte sowie eine verantwortungsbewusste Bauleitung. Nur so können Fehler bei der Ausführung vermieden oder Mängel im Entwurf erkannt und behoben werden.

Trotz bester Vorbereitung kann es immer wieder zu unerwarteten Schwierigkeiten auf der Baustelle kommen, auf die das Personal schnell und flexibel reagieren muß. Besonders bei der Herstellung der ersten Pfähle einer Gründung ist besondere Aufmerksamkeit nötig, um auftretende Schäden frühzeitig erkennen zu können.

Umfangreiche Herstellungshinweise für gängige Pfahltypen sind in den entsprechenden DIN-Normen für Bohrpfähle (DIN 4014 teilweise ersetzt durch EN 1536), Rammpfähle (DIN 4026) und Verpreßpfähle (DIN 4128) zu finden.

Einige Beispiele für Schadensursachen infolge der Bauausführung sind nachfolgend aufgeführt.

Bei *Stahlpfählen* können Schäden an der Korrosionsschutzbeschichtung bereits bei unsachgemäßem Transport auftreten [99]. Stahlflügelpfähle versagen häufig torsionsartig durch Überbeanspruchung oder falsches Rammen [97].

Fehlstellen bzw. Schaft einschnürungen an *Bohrpfählen* sind z.B. zu beobachten bei schlechter Betonqualität [51], mangelnder Fließfähigkeit des Betons oder bei Fehlern in der Synchronisation des Ziehvorgangs der Verrohrung mit der Betonage [22].

Bei *Ortbetonrammpfählen* kommt es häufig bei großer Rammgeschwindigkeit zu einem erhöhten Porenwasserdruck im seitlich verdrängten Boden. Beim Ziehen der Verrohrung kommt es in Folge dessen zu Schaft einschnürungen.

Auch die *Herstellungsreihenfolge* der Pfähle kann zu Schäden führen. Bei der Herstellung von unbewehrten Ortbetonpfählen kann es zum Abriß des Pfahlschafts in geringer Tiefe kommen. Die Schäden an den zunächst fehlerfrei hergestellten Pfählen können bedingt sein durch die Reihenfolge beim Versetzen des schweren Bohrgerätes in Verbindung mit ungünstigen Bodenverhältnissen.

Bei *Rammpfählen* können derartige Schäden bei Zugspannungen entstehen, die aus Mantelreibung resultieren, wenn unmittelbar neben einem hergestellten Pfahl gerammt wird. Generell ist auch bei planmäßig unbewehrten Pfählen eine konstruktive Kopfbewehrung zu empfehlen.

Schadensausbildung

Die beschriebenen, beispielhaften Ursachen bei der Pfahlherstellung bewirken sehr unterschiedliche Schadensausbildungen. Wenn ein Schadensfall mit einem Prüfverfahren analysiert werden soll, ist der Zusammenhang von Schadensausbildung und Ursache von großer Bedeutung. Daher wird in Tab. 2.1 ein kurzer Überblick zu diesem Zusammenhang gegeben. Es können Geometrie- und Materialfehlstellen als Schadensausbildung unterschieden werden. Eine eindeutige Zuordnung der Schadensausprägungen zu bestimmten Pfahltypen ist nicht möglich, da sich die Schadensbilder stark überschneiden.

Tab. 2.1: Übersicht möglicher Schadensausbildung und Ursachen

Schadensausbildung	mögliche Ursachen
Einschnürungen des Pfahlschafts	<ul style="list-style-type: none"> - erhöhter Porenwasserdruck im seitlich verdrängten Boden bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung - mangelnder Wasserüberdruck in der Verrohrung; zu schnell gezogene Verrohrung; zu steife Betonkonsistenz bei der Bohrpfahlherstellung - ungenügender Betondruck bei der Herstellung von Verpreßpfählen

Schadensausbildung	mögliche Ursachen
Ausbauchungen des Pfahlschafts	<ul style="list-style-type: none"> - Beton extrem fließfähig und sehr weicher oder locker gelagerter Baugrund; extreme Schichtwechsel bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung - schwankender Druck bei der Verpreßpfahlherstellung
horizontale Anrisse oder Durchbrüche des Pfahlschafts	<ul style="list-style-type: none"> - Zugfestigkeit des Pfahls beim Einrammen überschritten; fehlende oder mangelhafte Zugbewehrung; Rammfehler bei Fertigpfählen - Herstellungsreihenfolge bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung
Abscheren des Pfahlschafts	<ul style="list-style-type: none"> - starke Überrammung; fehlende oder mangelhafte Zugbewehrung; große Rammhindernisse im Baugrund bei Fertigpfählen - mangelhafte oder fehlende Bewehrung; falsche Bemessung oder Überbeanspruchung bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung
zerstörter Pfahlkopf	<ul style="list-style-type: none"> - Überrammung des Pfahls durch zu hohe Schlagzahlen oder zu leichtes Fallgewicht bei Fertigpfählen
zerstörte Betondeckung	<ul style="list-style-type: none"> - betonangreifende Medien im Grundwasser oder Boden (Kohlensäure, Schwefel etc.) - Auswaschungen durch Grundwasser
Betondeckung zu gering oder ungleichmäßig	<ul style="list-style-type: none"> - fehlende oder falsch angebrachte Abstandhalter am Bewehrungskorb; Bewehrungskorb zu groß bzw. Bohrlochdurchmesser zu gering bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung - schwankender Druck bei der Verpreßpfahlherstellung
schlecht umflossene und z.T. frei liegende Bewehrung	<ul style="list-style-type: none"> - nicht ausreichend fließfähiger Beton bei der Bohrpfahlherstellung
Kiesnester bzw. zementlose Abschnitte	<ul style="list-style-type: none"> - Auswaschungen durch starke Grundwasserströmung bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung - Entmischung des Betons durch große Fallhöhen beim Schütten bei der Bohrpfahlherstellung
Bereiche mit geringer Betonqualität	<ul style="list-style-type: none"> - Sandeinschwemmungen durch ungenügenden Rohrin- nendruck (Wasser/Suspension) bei der Bohrpfahlherstellung - Verunreinigungen und Einschlüsse z.B. im Pfahlfußbereich; schwankende Betonqualität des Einbaumaterials bei der Ortbetonramm- oder Bohrpfahlherstellung.
tordierter Stahlrammpfahl	<ul style="list-style-type: none"> - unsachgemäße Rammung; exzentrische Belastung; Rammhindernisse im Baugrund

Generell lassen sich die Schadensausbildungen in innere und äußere Schäden unterteilen. Zu den inneren Schäden zählen diejenigen, die an den Pfählen selbst entstanden sind. Die äußeren Schäden zeichnen sich durch Schäden an umliegenden Bauwerken, z.B. durch Bodenauflockerungen, Bodenentzug oder Erschütterungen aus. In der vorliegenden Arbeit werden nur die inneren Schäden bzw. die Pfahlintegrität betrachtet.

Inwieweit die beschriebenen Schadensausbildungen mit Prüfverfahren zur Qualitätskontrolle einer Pfahlgründung erfaßt werden können, wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

2.2 Qualitätskontrolle von Pfahlgründungen

Um die in Kap. 2.1 beschriebenen Schadensausbildungen festzustellen und zu vermeiden, ist eine Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Pfahlgründungen zwingend erforderlich. Man unterscheidet die Qualitätssicherung während der Herstellung und die Kontrolle im direkten Anschluß an die Herstellung.

Die erforderliche Qualitätssicherung während der Herstellung unterscheidet sich stark nach dem herzustellenden Pfahltyp. Grundsätzlich wird die Qualitätssicherung über die entsprechenden Normen für die einzelnen Pfahltypen geregelt. Hierbei spielt die Anfertigung von Herstellungsprotokollen eine große Rolle. Detaillierte Informationen über die notwendigen Angaben für z.B. Bohrprotokolle sind in [22] enthalten.

Bei der Qualitätskontrolle nach der Herstellung werden grundsätzlich zwei Fragestellungen betrachtet. Das ist zum einen die vorhandene Pfahltragfähigkeit und zum anderen die Pfahlintegrität des Pfahlschafts. Die Verfahren zur Ermittlung der Pfahlintegrität werden im Kap. 2.3 ausführlich beschrieben.

Gängige Verfahren zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit sind die statische Probelastung und die dynamische „high-strain“ Pfahlprüfung. Neben diesen beiden Verfahren existieren noch Sonderformen wie z. B. die statnamische Pfahlprüfung [57]. Aus den Ergebnissen der Verfahren können außerdem Aussagen zur Überprüfung der Bemessungsgrundlagen, zur Prüfung der Eignung eines Pfahlsystems für vorliegende Baugrundverhältnisse oder zum Nachweis der Einhaltung von Verschiebungsgrenzwerten abgeleitet werden [17].

Bei der statischen Probelastung wird zwischen Druck- und Zugbelastungen sowie zwischen der vertikalen- und horizontalen Probelastung unterschieden. Die Grundsätze für Probelastungen sind in den Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen der DGGT, dem Eurocode 7, der DIN 1054 sowie in der DIN 4020 behandelt. Bei der Druckprobelastung wird auf den Pfahlkopf die Belastung in an die Setzung anzupassenden Laststufen bis zur Prüflast aufgebracht. Für die einzelnen Laststufen sind bestimmte Mindestbeobachtungszeiten einzuhalten. Zur Lasteinleitung sind Widerlagerkonstruktionen erforderlich. Als Pressenwiderlager dienen entweder Totlasten oder Reaktionspfähle bzw. –anker. Das Ergebnis der Probelastung wird in einem Last-Setzungs-Diagramm dargestellt [12].

Eine sehr viel weniger aufwendige und damit wirtschaftlichere Alternative zur statischen Probelastung stellt der dynamische Pfahltest dar [76]. Bei dieser Pfahlprüfmethode wird ein Stoßimpuls mit Hilfe eines Rammschlags oder eines speziellen Fallgewichts in den Pfahlkopf eingeleitet. Die sogenannte „high-strain“ Methode bewirkt bleibende Verschiebungen des Pfahls, wobei Bodenwiderstände an Pfahlmantel und –spitze geweckt werden. Die Wellenausbreitungsvorgänge werden mit Beschleunigungs- und Dehnungsaufnehmern am Pfahlschaft im Bereich des Kopfes gemessen. Die Auswertung, z.B. nach dem CAPWAP Verfahren, basiert auf der Identifikation eines eindimensionalen Modells mit Hilfe der Meßergebnisse. Das Ergebnis der Prüfung wird in einem rechnerischen Last-Setzungs-Diagramm dargestellt. Die Auswertung ermöglicht bezüglich der Lastabtragung eine Aufteilung in Spitzendruck und Mantelreibungsverteilung [48]. Im begrenzten Maße sind auch Aussagen über die Pfahlintegrität möglich [78]. Zur Durchführung dieser Pfahlprüfungen sind die Empfehlungen des Arbeitskreises 2.1 der DGGT [17] maßgebend. Die theoretischen Überlegungen zur Wellenausbreitung, die der dynamischen Pfahlprüfung nach der „high-strain“ Methode zugrunde liegen, stimmen überwiegend mit den Grundlagen der dynamischen Pfahlprüfung nach der „low-strain“ Methode zur Bestimmung der Pfahlintegrität überein und sind in Kap.3 erläutert. Zunächst werden die Methoden zur Ermittlung der Pfahlintegrität vorgestellt.

2.3 Methoden zur Ermittlung der Pfahlintegrität

Um die Pfahlintegrität, d.h. die Unversehrtheit des Pfahlschafts feststellen zu können, existieren unterschiedliche Methoden. Mit Hilfe dieser Methoden können Aussagen zur inneren Tragfähigkeit eines Pfahles abgeleitet werden. Hierbei gelten für die verschiedenen Methoden unterschiedliche Aussagemöglichkeiten und Anwendungsgrenzen. Im wesentlichen existieren folgende Methoden [82]:

- Pfahlfreilegung
- Kernbohrung
- Ultraschallmessung
- Vibrationsverfahren
- Stoßprüfung: dynamische „low-strain“ Pfahlprüfung (Reflexionsmethode)
- Sonderformen der Stoßprüfung: Austin Verfahren, hydroelektrische Spannungsmethode, seismischer Paralleltest, Biegewellenmethode.

Im folgenden wird ein kurzer Überblick zu jedem Verfahren gegeben. Den Schwerpunkt bilden hierbei die Stoßprüfungen.

Pfahlfreilegung

Hierbei kann eine visuelle Begutachtung der Pfahlgeometrie erfolgen. Da der Kosten- und Zeitaufwand, einen Pfahl freizuschachten, mit zunehmender Tiefe überproportional ansteigt, ist diese Methode nur im Bereich des Pfahlkopfs sinnvoll. Eine aufwendige Baugrubensicherung ist in Abhängigkeit der anstehenden Baugrundverhältnisse erforderlich. Aussagen zur Betonqualität können ohne zusätzliche Untersuchungen nur aufgrund der visuellen Beschaffenheit des Pfahlschaftoberfläche erfolgen [82].

Kernbohrung

Kernbohrungen können innerhalb eines Pfahlquerschnittes ausgeführt werden. Die Bohrungen sind zeit- und kostenintensiv. In Abhängigkeit des verwendeten Bohrgerätes können unterschiedlich lange bzw. durchgehende Bohrkerne gewonnen werden. Mit Hilfe betontechnologischer Untersuchungen kann die Qualität des Pfahlbetons bestimmt werden. Fehlstellen, wie z.B. Einschnürungen oder Entmischungszonen, sind nur erkennbar, wenn sie direkt erbohrt werden [82].

Ultraschallmessung

Bei der Ultraschallmessung handelt es sich um eine Art Bohrlochverfahren. Die Pfähle müssen axiale Hohlräume besitzen, die im Regelfall bei der Pfahlherstellung durch entsprechende Führungsrohre oder nachträglich durch Kernbohrungen geschaffen werden müssen. Die Führungsrohre werden bei der Meßdurchführung mit einer Sonde durchfahren.

Bei den Ultraschallmethoden wird die Durchlaufzeit von Longitudinalwellen durch den Pfahlquerschnitt und die Empfangsstärke des Signals mittels Sender und Empfänger gemessen. Mit der Kenntnis des Abstandes von Sender und Empfänger läßt sich die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswelle berechnen. In homogenem Beton liegt diese je nach Betonfestigkeitsklasse zwischen 3500 und 4000 m/s. Abweichungen bezüglich dieses Normalwertes deuten auf Defekte im Pfahlschaft hin. Bereiche mit minderwertigem Beton sowie Kiesnestern und Bodeneinschlüssen führen zu einer Verlängerung der Durchlaufzeit der Wellen. Brüche und Hohlräume verursachen eine Ausblendung des Signals.

Ultraschallprüfungen sind auch bei großen Pfahllängen und -durchmessern einsetzbar. Die Methode erlaubt es, Fehlstellen mit minderwertigem Beton, Kiesnester und Bodeneinschlüsse sowie vollständige Diskontinuitäten in Pfahlquerschnitten zu unterscheiden. Ebenso läßt sich die Tiefenlage der Fehlstellen auf etwa einen Dezimeter genau orten. Der äußere Mantelbereich des Pfahles ist nicht erfaßbar, da es praktisch nicht möglich ist, die Führungsrohre außerhalb der Schaftbewehrung anzubringen. Aussagen über die Form des Pfahlschaftes sind nicht möglich.

Zur Anregung und Aufnahme der Longitudinalwellen werden piezoelektrische Sender und Empfänger benutzt. Die von einem Generator erzeugten elektrischen Impulse werden vom Sender in Ultraschallwellen umgewandelt und nach Durchlaufen des Pfahles von dem Empfänger wiederum in elektrische Signale zurückgewandelt. In der Praxis liegt die Prüffrequenz zwischen 40 – 100 kHz. Mit der berechneten Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ergeben sich Wellenlängen im Bereich von 8 – 10 cm [46].

Bei der Prüfung muß darauf geachtet werden, daß der Abstand zwischen Sender und Empfänger größer als die zehnfache Wellenlänge ist. Andernfalls stellt sich keine ungestörte Wellenausbreitung ein, und es kommt zu einer fehlerhaften Interpretation. Um auch den Einfluß der Transversalwellen auf das Meßergebnis auszuschließen, werden Sender und Empfänger in einer wassergefüllten Bohrung abgelassen. In Wasser ist nur die Übertragung von Longitudinalwellen möglich.

Im wesentlichen werden zwei Methoden bei der Ultraschallmessung unterschieden. Dieses sind die Single Hole Sonic Logging Methode (Streustrahlungsmethode) und die Cross Hole Sonic Logging Methode (Durchstrahlungsmethode). Beide Methoden werden zur Bewertung der Integrität von Tiefgründungen eingesetzt. Eine Erweiterung dieser Methoden stellt die Wet Sonic Logging Methode dar. Im Unterschied zu der Anwendung auf bereits abgebundene Betonstrukturen wird sie direkt nach der Herstellung des Pfahles zur Integritätsprüfung herangezogen [48].

Die Prüfung mit der Cross Hole Sonic Logging Methode eines Pfahles erfolgt in der Weise, daß man in zwei gegenüberliegenden Führungsrohren die Sender- und Empfängersonde bis auf den Pfahlfuß absenkt und beide Sonden kontinuierlich und lageparallel bis zum Pfahlkopf hochzieht (Abb. 2.1).

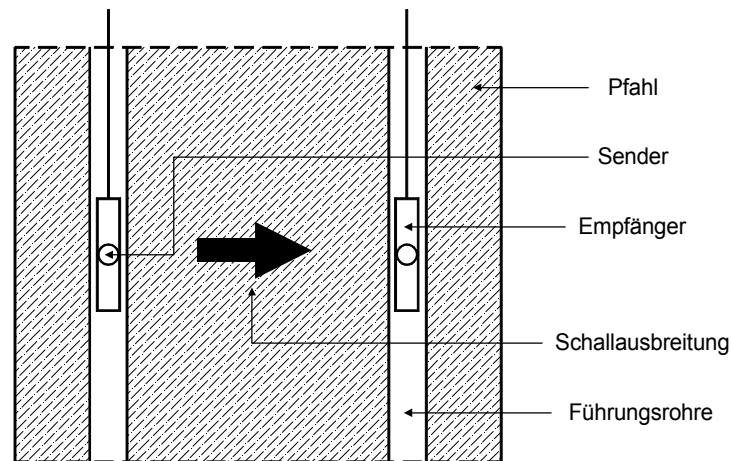


Abb. 2.1: Cross Hole Sonic Logging Methode

Bei einem homogenen Pfahlbeton muß die festgestellte Durchlaufzeit der Wellen über die gesamte Pfahllänge konstant bleiben. Beim Auftreten einer Fehlstelle wird der Pfahl in einem zweiten Durchgang erneut durchschallt. Gleichzeitig wird das empfangene Signal mit größerem Auflösungsvermögen und größerem Maßstab dargestellt.

Als Führungsrohre werden PVC- oder Stahlrohre verwendet, die am Bewehrungskorb befestigt und mit diesem einbetoniert werden [11]. Normalerweise werden drei Rohre je Pfahl installiert [46].

Um die Single Hole Sonic Logging Methode durchzuführen, muß nur ein Führungsrohr in dem zu untersuchenden Pfahl vorhanden sein, in das die Ultraschallsonde hinabgelassen wird. Zur Versuchsdurchführung werden ein Sender und ein Empfänger auf den Grund des Führungsrohres herabgelassen. Während des Versuchs werden die in konstantem Abstand senkrecht übereinander hängenden Empfänger und Sender langsam nach oben gezogen. Dabei strahlt der Sender proportional zur zurückgelegten Strecke Wellen ab. Breitband-Ultraschallwellen mit Mittelfrequenzen von 10 – 100 kHz durchdringen den Beton. Sie werden je nach den physikalischen Gegebenheiten des Bodens, der Einschlüsse oder Fehlstellen verzögert oder abgeschwächt (Abb. 2.2).

Die Single Hole Sonic Logging Methode ist bei Pfahldurchmessern von weniger als einem Meter sinnvoll, da der Durchmesser zu klein für die Installation mehrerer Führungsrohre ist. Die Resultate der Methode bezüglich der Anwendung und ihrer Grenzen sind ähnlich denen aus der Cross Hole Sonic Logging Methode. Die Methode ist darüberhinaus einfacher und schneller durchzuführen. Allerdings liefert sie schlechtere horizontale Auflösungen der Signale als die Cross Hole Sonic Logging Methode. Dieses kann damit begründet werden, daß mit einem Rohr nicht mehrere Profile über den Querschnitt, wie bei der Cross Hole Sonic Logging Methode, aufgezeichnet werden können [11].

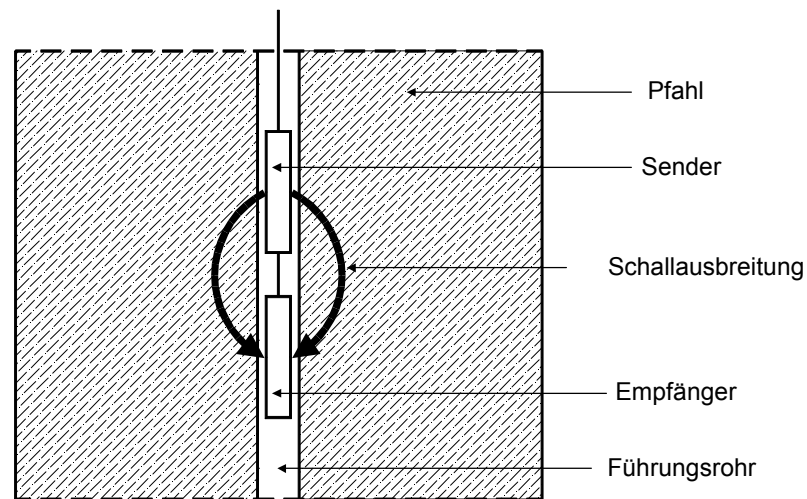


Abb. 2.2: Single Hole Sonic Integrity Logging Set Up [10]

Die neuartige Wet Sonic Logging Methode ist eine Erweiterung der beiden vorgestellten Methoden, bei der Fehlstellen direkt nach dem Betonieren des Pfahles ermittelt werden können [10]. Die Durchführung und Auswertung der eigentlichen Messung ist identisch mit den beiden konventionellen Methoden. Der Unterschied besteht darin, daß die Prüfung am Frischbetonpfehl durchgeführt wird. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, erkannte fehlerhafte Stellen im Pfehl sofort zu beheben.

Bei allen beschriebenen Ultraschallmethoden werden die Meßdaten digitalisiert und gespeichert. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt als Sonic Profile oder als Zeitimpulslinie [92].

Vibrationsverfahren

Das Vibrationsverfahren ist eine Schwingprüfung. Dieses Verfahren wurde in Frankreich von dem Centre Experimental des Recherches et d'Études du Batiment et des Travaux Public (CEBTP) entwickelt.

Bei diesem Verfahren wird der Pfehlkopf mit einem Vibrator bei gleichbleibender Kraft und variierender Frequenz angeregt. Mit Hilfe von piezoelektrischen Meßaufnehmern werden die Kraftamplitude und die Geschwindigkeit gemessen. Die Messung erfolgt im Zeitbereich und wird zur Analyse in den Frequenzbereich transformiert. Die mechanische Admittanz ist definiert als Quotient aus resultierender Schwinggeschwindigkeit v und erregender Kraft F . Als Ergebnis wird die Admittanz des Pfehl-Boden-Systems als Funktion der Frequenz dargestellt. Aus den Meßkurven lassen sich somit Rückschlüsse auf die Pfehllänge und die Art der Fehlstellen ziehen.

Die Meßausrüstung ist aus Abb. 2.3 zu ersehen und besteht im wesentlichen aus einem elektromagnetischen Vibrator und einem Beschleunigungsaufnehmer. Um Fehlinterpretation

tionen aus Wellenüberlagerungen auszuschließen, wird die Frequenz der erregenden Kraft kontinuierlich variiert. Sie liegt dabei zwischen 10 und 1000 Hz. Ein Regelkreis sorgt dafür, daß die Amplitude der Kraft immer gleich groß bleibt [46].

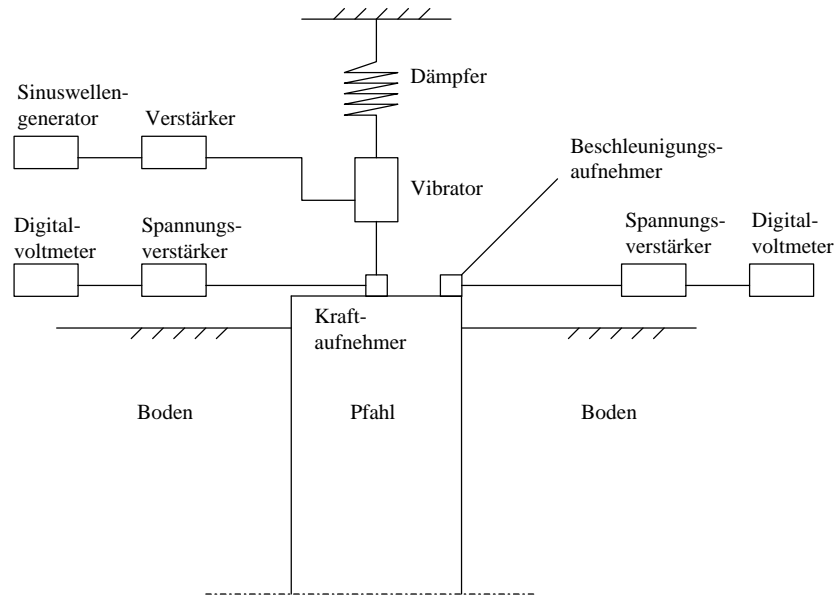


Abb. 2.3: Meßanordnung bei der Vibrationsmethode [69]

Als Ergebnis der Messung (Abb. 2.4) wird die gemessene Admittanz über die Frequenz aufgetragen und als Meßkurve dargestellt. Sie ist abhängig von der Geometrie und der Betonqualität des Pfahles sowie von den Bodeneigenschaften. Die theoretische Admittanz N ist der Kehrwert der Impedanz (vgl. Gleichung 3.12) und ergibt sich zu:

$$N = \frac{1}{\rho \cdot c \cdot A} \quad (2.1)$$

mit der Betondichte ρ , der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c und der Pfahlquerschnittsfläche A . Aus dem Vergleich der berechneten mit der gemessenen mittleren Admittanz N wird auf die Integrität des Pfahles geschlossen. Q und P sind die Minima bzw. Maxima der gemessenen Admittanz. Ist die gemessene Admittanz wesentlich größer als die berechnete, liegt ein Defekt vor, der entweder auf einer Querschnittsschwächung oder einer minderwertigen Betonqualität beruht. Bei fehlerfreien Pfählen ist der Frequenzabstand Δf zugehöriger Resonanzen konstant:

$$\Delta f = \frac{c}{2 \cdot L} \quad (2.2)$$

mit der Pfahllänge L . Die Resonanzen entstehen bei bestimmten Frequenzen, wenn die überlagernden auslaufenden und reflektierten einlaufenden Wellen gleichphasig sind. Bei defekten Pfählen sind die zur Pfahllänge gehörenden Resonanzen nur schwer feststellbar, da die Wellen bereits an der Fehlstelle zum größten Teil reflektiert werden. Falls die Pfahllänge bekannt ist, kann mit dem gemessenen Frequenzabstand die

Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c berechnet werden. Ist auf der anderen Seite die Betonqualität und somit die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bekannt, kann durch Messen des Frequenzabstandes die Pfahlänge bestimmt werden.

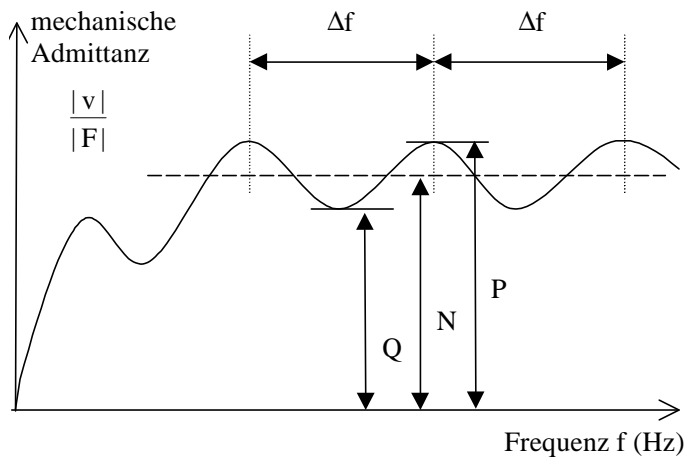


Abb. 2.4: Auswertung der Vibrationsmethode [69]

Mit der Vibrationsmethode lassen sich die Pfahlänge, Querschnittsveränderungen ab ca. 20 mm, horizontale Risse und die Betonqualität von Stahlbetonpfählen überprüfen. Die überprüfbare Pfahlänge liegt bei ca. 20 m. Nicht erfassen lassen sich hingegen die geometrischen Abmessungen einer Fehlstelle sowie freiliegende Bewehrung und vertikale Risse [82].

Im Vergleich zur Ultraschallmessung oder der Reflexionsmethode ist die baupraktische Bedeutung der Vibrationsmethode gering. Verantwortlich hierfür ist der hohe Durchführungsaufwand im Vergleich zu den Aussagemöglichkeiten der Methode. Eine direkte Auswertung des Meßsignals im Zeitbereich ist nicht möglich. Es ist zunächst eine aufwendige Analyse erforderlich.

Integritätsprüfung von Pfählen auf Basis der Reflexionsmethode

Die Integritätsprüfung nach dem sogenannten „low-strain“ Verfahren basiert auf der Reflexionsmethode. Hierbei wird ein Stoßimpuls mit einem speziellen Impulshammer geringer Masse in den Pfahlkopf eingeleitet. Die Ausbreitung der Stoßwelle im Pfahl bzw. ihr Reflexionsverhalten wird mit Beschleunigungsaufnehmern am Pfahlkopf gemessen (siehe Abb. 2.5) [77].

Wellenreflexionen treten nicht nur am Pfahlfuß, sondern auch im Bereich von Impedanzänderungen entlang des Pfahlschafts auf. Die Impedanz ist abhängig von der Querschnittsfläche, dem Elastizitätsmodul, der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Pfahl und dem vorhandenen Bodenwiderstand. Impedanzänderungen können daher z.B. durch Querschnitts- bzw. Materialänderungen entlang eines Pfahles begründet sein.

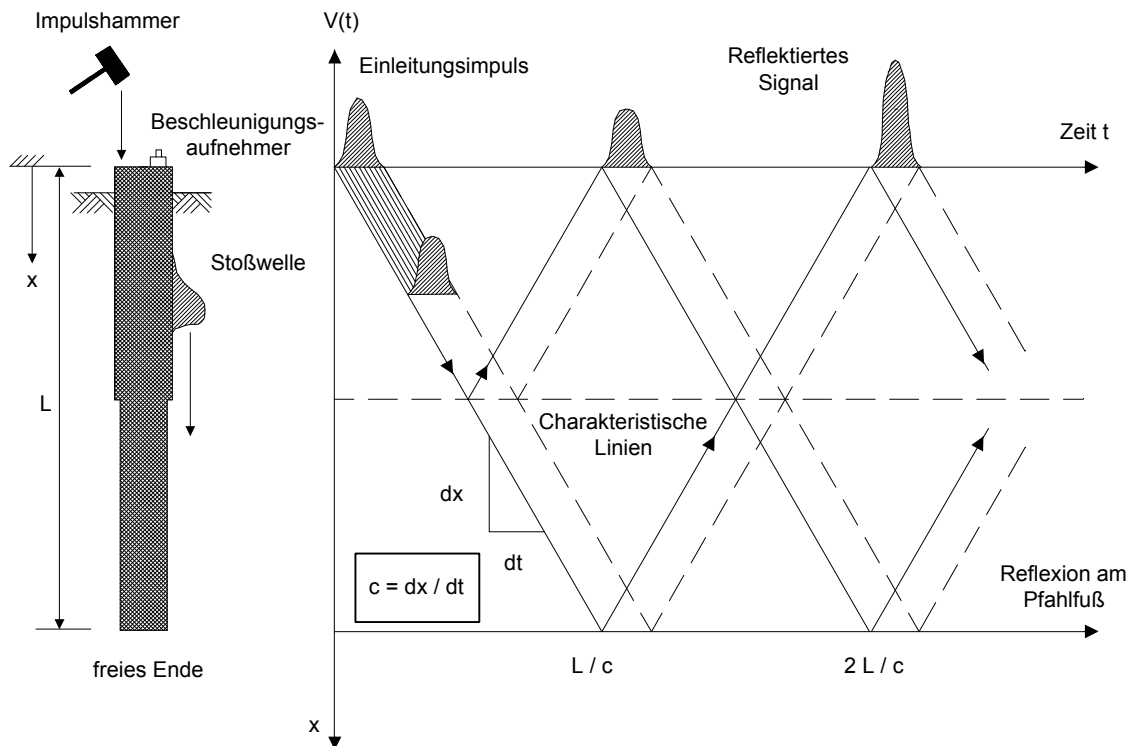


Abb. 2.5: Meßaufbau und Weg-Zeit- bzw. Geschwindigkeits-Zeit-Darstellung der Wellenausbreitung im Pfahl

Die hieraus entstehenden reflektierten Wellenanteile können im zum Geschwindigkeitsverlauf integrierten Meßsignal abgelesen und interpretiert werden [76]. Die theoretischen Grundlagen der Methode werden ausführlich in Kapitel 3 behandelt.

Beispielhaft sind in den Abb. 2.6 und 2.7 Meßsignale eines unversehrten Pfahls und eines Pfahls mit zusätzlichen Impedanzänderungen bzw. Fehlstellen dargestellt. Während bei dem Meßsignal des unversehrten Pfahls neben der Impulseinleitung nur eine Pfahlfußreflexion auftritt, sind in dem Signal des fehlerhaften Pfahls zusätzliche Wellenreflexionen erkennbar.

Die notwendige Meßinstrumentierung zur Durchführung einer Prüfung besteht im wesentlichen aus den drei Basiskomponenten: Impulshammer, Meßwertaufnehmer (Beschleunigungsaufnehmer) und Meßwerterfassung. Die meßtechnischen Grundlagen und Anforderungen an die Komponenten der Meßkette werden ausführlich in den Kapitel 3.2 und 4 erläutert. Zur Durchführung des Standardprüfverfahrens wurden von verschiedenen Herstellern Meßausrüstungen entwickelt. Zwei von den gängigsten Baustellengeräten sind der Pile Integrity Tester (PIT) der Firma PDI (Pile Dynamic Inc.) [28] und der Sonic Integrity Tester (SIT) der Firma TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research)[100].

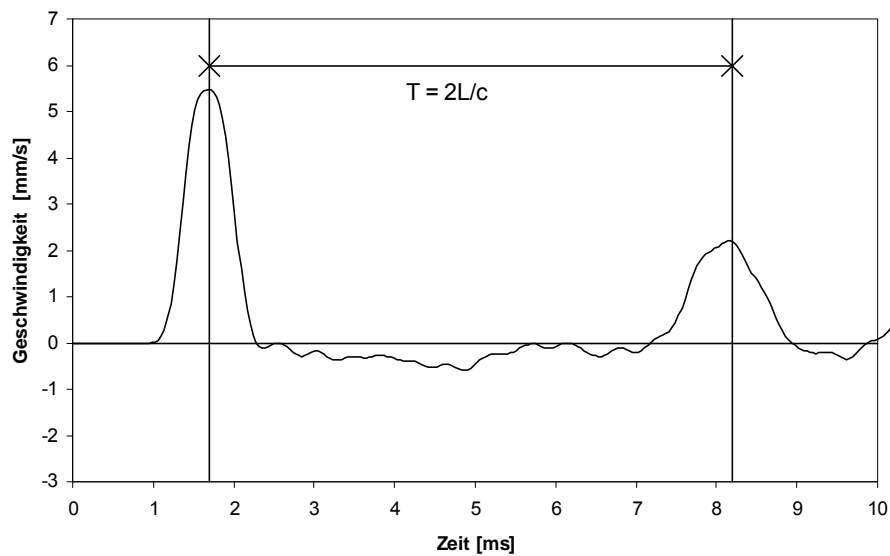


Abb. 2.6: Meßsignal eines unversehrten Pfahls

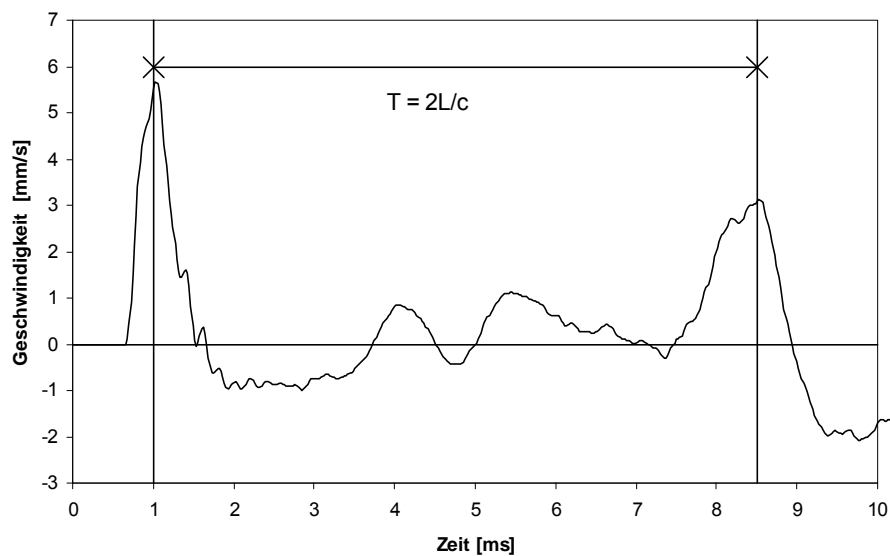


Abb. 2.7: Meßsignal eines Pfahls mit Fehlstelle

Die Standardauswertung der Integritätsprüfung erfolgt über die visuelle Begutachtung und Interpretation des Meßsignals im Zeitbereich. Bei der Beurteilung sind mehrere Ergebnisklassen zu unterscheiden [50], [17]. Zur Meßanalyse können verschiedene Filter verwendet werden. Um den Dämpfungseinfluß des Bodens auf das Meßsignal zu kompensieren, werden exponentielle Verstärkungsansätze verwendet. Zur Durchführung derartiger Meßanalysen stehen für die unterschiedlichen Meßsysteme spezielle Auswertungsprogramme zur Verfügung.

Vergleichbar mit der Vibrationsmethode kann zur Auswertung des Meßsignals auch eine Transformation in den Frequenzbereich durchgeführt werden. Mit Hilfe des Frequenzspek-

trums können die Pfahllänge und evtl. vorhandene Fehlstellen bewertet werden. Eine weiterentwickelte Auswertung des Frequenzspektrums ist die Mobilitätsanalyse. Hierbei wird der Geschwindigkeitsverlauf mit dem Kraftverlauf des Stoßimpulses überlagert. Die Zusammenhänge und Möglichkeiten der Frequenzauswertung sind im Kap. 7.3 beschrieben.

Eine erweiterte Auswertung des Meßsignals im Zeitbereich kann durch eine Simulation bzw. Identifikation des Signals erfolgen. Hierzu wurden für das Meßsystem der Firma PDI das Programm PITWAP [29] und für das System TNO das Programm TNO-WAVE [100] entwickelt. Das Programm PITWAP ermöglicht mit einer Rückrechnung des Meßsignals die Bestimmung eines Impedanzprofils. Hierbei können die verschiedenen Einflußgrößen der Impedanz nicht ausreichend differenziert werden. Bei dem Programm TNO-WAVE ist ebenfalls nur eine beschränkte Differenzierung der Einflußgrößen möglich. Aufgrund des Mehraufwandes und der häufig nicht zufriedenstellenden zusätzlichen Aussagen wird aber in der Regel bei der Standardauswertung auf derartige Analysen verzichtet.

Im folgenden werden Aussagemöglichkeiten und –grenzen der Standardprüfmethode beschrieben. Die Interpretation des Geschwindigkeitsverlaufes ermöglicht Aussagen zur Pfahllänge und über die Pfahlgeometrie (Einschnürungen, Risse, usw.).

Die erfolgreiche Längenermittlung bedarf einer deutlich erkennbaren Reflexion der Stoßwelle am Pfahlfuß. Bei großen Pfahllängen oder in Böden mit hoher Dämpfung kann das Impulssignal nach der Reflexion am Pfahlfuß so stark gedämpft werden, daß keine Längenermittlung mehr möglich ist. Ebenso ist die Längenermittlung bei Pfählen schwierig, die in die Oberkonstruktion von Fundamenten einbinden. Die dabei auftretenden Reflexionen können eine Auswertung teilweise unmöglich machen. Die Genauigkeit einer Längenermittlung ist stark abhängig von der möglichst exakten Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßwelle. Genauigkeitsgrenzen werden mit 5 bis 10% der Pfahllänge angegeben [17].

Genaue Aussagen über die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit sind nur durch Messungen an mehreren Pfählen bekannter Länge gemäß Herstellungsprotokoll zu belegen [102]. Referenzen zur Bestimmung der Größe der Wellengeschwindigkeit können z.B. anhand von Bohrkernmessungen geschaffen werden. Einfluß auf die Wellengeschwindigkeit hat die Betonqualität in Abhängigkeit von z.B. der Pfahlherstellungsart, dem Betonalter, den Zuschlagstoffen und dem Bewehrungsanteil. Lokale Änderungen der Wellengeschwindigkeit entlang des Pfahlschafts können durch Änderungen der Betonmaterialeigenschaften, wie z.B. Kiesnester, verursacht werden [89].

Vorhandene Geometrie- und Materialfehlstellen eines Pfahles können mit der Prüfmethode erkannt werden [80]. Über die Ausbildung der Fehlstellen sind qualitative Bewertungen möglich [93]. Kontinuierliche Querschnitts- bzw. Impedanzänderungen über die Tiefe führen zu nicht eindeutigen Meßsignalen [82]. Unregelmäßigkeiten bei der Betonüberdeckung der Pfahlbewehrung können mit der Standardmeßmethode nicht erkannt werden [88]. Mehrere Fehlstellen, besonders im Pfahlkopfbereich, führen zu Überlagerungen und wiederholten Wellenreflexionen, die in der Interpretation teilweise nicht mehr getrennt werden können [82].

Die Dauer des Stoßimpulses mit dem Handhammer begrenzt die interpretierbare Fehlstellenabmessung. Bei einer zu langen Stoßdauer kommt es zu Überlagerungen der Wellenreflexionen [33]. In Abhängigkeit der Stoßintensität und von Dämpfungsverlusten ist die überprüfbare Pfahllänge begrenzt. Zur Erzielung einer großen Genauigkeit müssen möglichst kurze Stoßimpulse hoher Intensität in der Pfahlkopf eingeleitet werden [82].

Die Abhängigkeit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von der Festigkeitsentwicklung im Beton wurde in [82] untersucht. Die Ergebnisse zeigen, daß ab einem Betonalter von ca. 10 bis 14 Tagen keine signifikanten Änderungen der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit auftreten.

Neben der beschriebenen Integritätsprüfung auf Basis der Reflexionsmethode existieren weitere Verfahren, die ebenfalls zu den Stoßprüfverfahren gehören.

Austin Verfahren

Das Austin Verfahren ähnelt dem bereits beschriebenen Verfahren der Integritätsprüfung auf der Basis der Reflexionsmethode. Der Unterschied der beiden Verfahren besteht in der Erweiterung der verwendeten Meßkette beim Austin Verfahren.

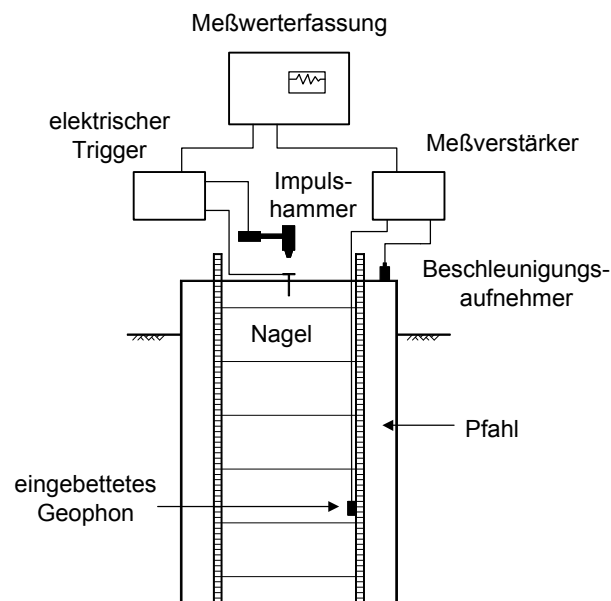


Abb. 2.8: Meßprinzip des Austin Verfahrens [41]

Zusätzlich zu einem Beschleunigungsaufnehmer am Pfahlkopf ist ein Geophon in den Pfahl eingebettet. Bei dem verwendeten Geophon handelt es sich um einen vertikalen Geschwindigkeitsaufnehmer, der in einem wasserdichten Behälter eingebaut ist. Zum Schutz vor Schäden wird er mit einem Betonzylinder ummantelt und an der Bewehrung des Pfahles angebracht. Als weitere Änderung der Meßkette ist bei diesem Verfahren erforderlich, daß die Messung mit dem Impulshammer als Trigger gestartet wird. Bei dem Verfahren wird ebenfalls die Wellenausbreitung bzw. ihre Reflexionen betrachtet.

Entwickelt wurde das Verfahren zur Prüfung der Integrität von Pfählen mit großem

Durchmesser bzw. kleinem Verhältnis von Pfahlänge zu –durchmesser. Die eindimensionale Ausbreitung der Dehnwelle in einer stabförmigen Struktur ist hierbei nicht gegeben. Die Wellenausbreitung wird durch Oberflächeneffekte überlagert. Diese können die Interpretation des Meßsignals des Beschleunigungsaufnehmers am Pfahlkopf erschweren bzw. unmöglich machen. Bei dem zusätzlich verwendeten Geophon im Pfahlschaft treten diese Oberflächeneffekte nicht auf. Aus dem Abstand zwischen dem Aufschlagsort des Impulshammers und des Geophons sowie der Durchlaufzeit kann die resultierende Wellenausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Die mit Hilfe des Geophons gemessenen Wellendurchgänge bzw. –reflexionen dienen der Ermittlung der Pfahlänge und evtl. vorhandener Fehlstellen.

Mit der beschriebenen Methode ist es möglich, die Integrität von Pfählen großen Durchmessers zu bestimmen. Aussagen zur Pfahlänge und zu Querschnittsänderungen, Rissen oder Qualitätsänderungen im Beton können gemacht werden. Hierbei gelten vergleichbare Einschränkungen wie bei der beschriebenen Stoßprüfung auf Basis der Reflexionsmethode. Die verwendeten Geophone müssen während der Pfahlherstellung installiert werden und sind nicht wiedergewinnbar. Dadurch ist die flexible Auswahl und Anzahl der prüfbaren Pfähle stark eingeschränkt. Die baupraktische Bedeutung dieser Methode ist vergleichsweise gering.

Hydroelektrische Spannungsmethode

Die hydroelektrische Spannungsmethode basiert auf der Ausbreitung von Stoß- bzw. Schockwellen. Die Methode wurde vom Xian Highway Research Institute und dem Institut of Electrical Engineering, Academia Sinica, China entwickelt. Ziel ist hierbei die Integrität von Pfählen mit großem Durchmesser und großer Länge zu bestimmen, bei denen andere Methoden versagen [105].

Ein wesentlicher Unterschied dieser Methode besteht in der Stoßimpulserzeugung.

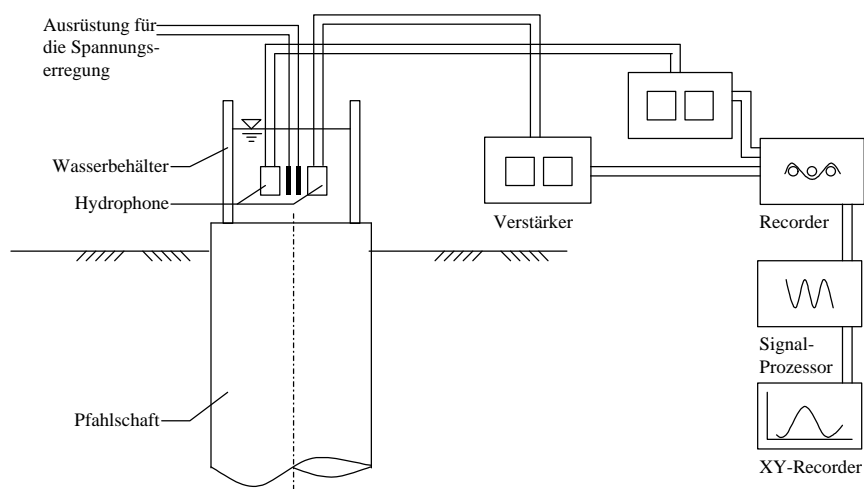


Abb. 2.9: Meßanordnung der Hydroelektrischen Spannungsmethode [105]

Der Stoßimpuls wird nicht mit einem Impulshammer, sondern mit einer speziellen hydroelek-

trischen Vorrichtung erzeugt. Zur Vorbereitung auf die Messung wird ein Wasserbehälter aus verstärktem Stahl auf dem Pfahlkopf fixiert. Der Behälter wird mit Wasser gefüllt und die Meßeinrichtung wird installiert. Bei Versuchsbeginn wird ein starker Strom durch die Elektrode geschickt. Dies führt zu einer schlagartigen Temperaturerhöhung zwischen den Kondensatorplatten. Durch den Druck des erzeugten Dampfes breitet sich eine Schockwelle über die Wassersäule in den Pfahl aus. Der maximale Druck läßt sich aus dem Energiegleichgewicht berechnen [105].

Die Wellenausbreitung im Pfahl wird durch Hydrophone erfaßt. Zur Auswertung werden die Meßsignale in den Frequenzbereich transformiert. Die Interpretation ermöglicht Aussagen zur Integrität eines Pfahls. Die Aussagemöglichkeiten zur genauen Fehlstellenausbildung sind im Vergleich zu den bisher vorgestellten Verfahren gering.

Neben der Integrität läßt sich mit der hydroelektrischen Spannungsmethode bei entsprechend großer Impulseinleitung und meßtechnischer Bestückung die Tragfähigkeit eines Pfahles untersuchen.

Durch den hohen Aufwand der Meßdurchführung wird die Methode zur Integritätsprüfung nur in Einzelfällen bei sehr langen Pfählen und großen Durchmessern eingesetzt. Beurteilen lassen sich die Pfahllänge, Querschnittsänderungen und die Betonqualität des Pfahles [105]. Es ist jedoch lediglich eine grobe Bestimmung der Fehlstelle möglich.

Seismischer Paralleltest

Der seismische Paralleltest ist eine weitere Form der Stoßprüfung. Er dient zur Bestimmung der Einbindetiefe bzw. der Länge von Beton-, Holz und Stahlpfählen sowie von Spundwänden. Der Test wird insbesondere dann verwendet, wenn der Pfahlkopf nicht zugänglich ist [59].

Vor der Meßdurchführung ist die Erstellung einer Bohrung erforderlich. In ein an den Pfahl angrenzendes und parallel zu diesem verlaufendes Bohrloch wird ein geschlitztes Rohr eingebaut. Typische Abstände zwischen Bohrloch und Pfahl liegen zwischen 1,5 und 3,0 m. Das Bohrloch muß ca. 3 – 5 m tiefer reichen als der zu untersuchende Pfahl, da sonst die genaue Länge des Pfahles nicht ermittelt werden kann [59].

Das Rohr wird mit Wasser gefüllt und ein Hydrophon wird auf dessen Boden abgesenkt. Durch den Schlag eines Impulshammers gegen den Pfahl wird eine Stoßwelle erzeugt, die zunächst den Pfahlschaft axial und schließlich den angrenzenden Boden durchläuft, um letztlich von dem Hydrophon erfaßt zu werden. Zu jeder sich schrittweise verändernden Tiefenposition des Hydrophons wird ein derartiger Impuls eingeleitet und die zugehörige Durchlaufzeit gemessen und dargestellt. Zur Interpretation der über die gesamte Höhe des Bohrloches vorliegenden Meßkurven ist die Kenntnis des Verhältnisses der Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten im Beton und im Boden notwendig.

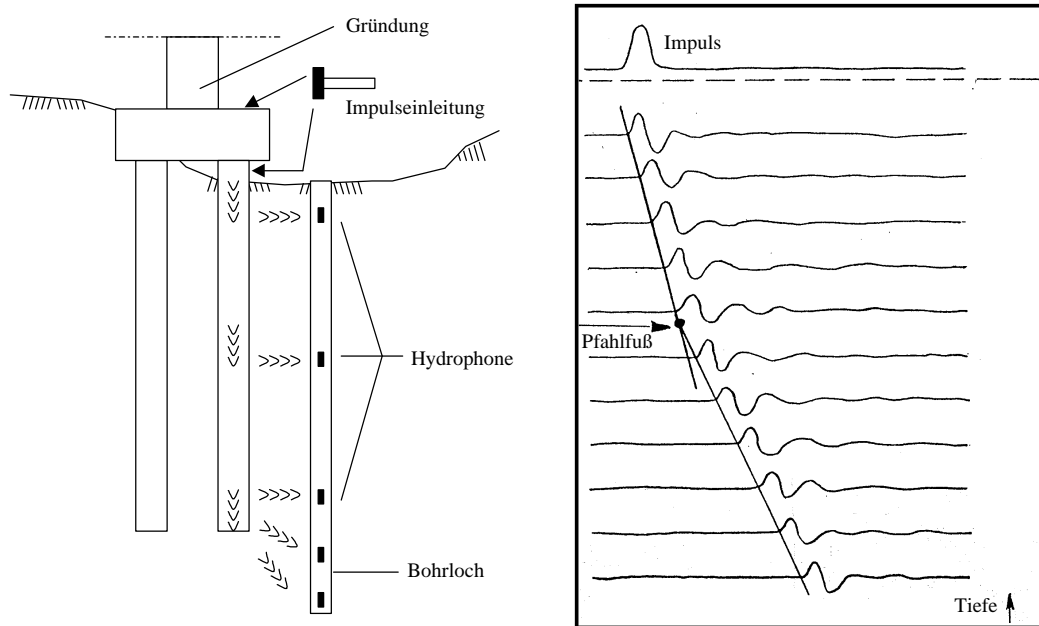


Abb. 2.10: Meßanordnung und Auswertung der Meßkurven [59]

Zur erfolgreichen Testdurchführung muß die Wellengeschwindigkeit im Boden signifikant geringer als die im Beton sein [59].

Solange sich das Hydrophon unterhalb des Pfahlfußes befindet, nimmt die Durchlaufzeit des Stoßimpulses linear ab, d.h. die Laufstrecke, die der Stoßimpuls den Boden durchläuft, nimmt bis zum Erreichen des Pfahlfußes ab. Der direkte Abstand zwischen Pfahl und Hydrophon bleibt nun von diesem Punkt ab konstant. Wird das Hydrophon über diese Position hinaus weiter nach oben gezogen, werden die Abstände der Durchlaufzeiten bei weiterhin gleichen Wegunterschieden geringer. Die Verringerung des Abstandes findet nunmehr nur in dem Pfahl statt. Die Länge des Pfahles kann aus der graphischen Darstellung der Wellendurchlaufzeiten mit Hilfe des Tangentenschnittpunktes bestimmt werden (Abb. 2.10, rechts) [59].

Der seismische Paralleltest ist eine Methode, die lediglich zur Bestimmung der Länge eines Pfahles oder einer Spundwand dient. Die Länge kann bestimmt werden, auch wenn der Pfahl oder die Spundwand in einen Oberbau einmünden.

Zur erfolgreichen Anwendung des Tests ist es notwendig, daß die Stoßwelle das Hydrophon erreicht, um die Durchlaufzeit messen zu können. Bei sehr langen Pfählen kann die Dämpfung das Signal soweit abschwächen, daß es nicht mehr erfaßbar ist. Treten z.B. Risse im Pfahl auf, die das Signal vollständig reflektieren, kann es ebenfalls zu Interpretationsproblemen kommen.

Beim seismischen Paralleltest können große Pfahllängen untersucht werden, da das Signal den Pfahlschaft nur einmal passieren muß [59]. Darüber hinaus ist eine relativ genaue Längenbestimmung der untersuchten Betonstrukturen möglich, da keine absoluten, sondern nur relative Wellengeschwindigkeiten benutzt werden. Dieses kann aber bei starken

Schwankungen der Wellengeschwindigkeiten im Boden, z.B. bei Bodenschichtungen, zu Interpretationsproblemen führen.

Eine wesentliche Anwendungsgrenze der Methode besteht in der Untersuchung von Pfählen, die in Fels einbinden. Weist der Fels eine ähnliche Wellenausbreitungsgeschwindigkeit wie der Beton auf, so ist die Ermittlung der Pfahllänge nicht mehr möglich.

Biegewellenmethode

Die Biegewellenmethode ist eine Stoßprüfung, die zur Ermittlung der Einbindetiefe von Pfahlgründungen angewandt wird. Sie ist zur Ermittlung der Einbindetiefe von Holzpählen entwickelt worden und wurde auf die Anwendung bei Stahlprofilen ausgeweitet. Die Methode nutzt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle als Indikator für die strukturelle Beschaffenheit und die effektive Länge eines eingebetteten Pfahls [14].

Zur Durchführung der Methode werden seitlich am Pfahlschaft zwei Beschleunigungsaufnehmer mit bekanntem Abstand untereinander angebracht. Der Pfahl wird seitlich mit einem Stoßimpuls angeregt, so daß sich Biegewellen im Pfahl ausbreiten. Der Pfahl wird deshalb seitlich angeregt, weil dies bei den betrachteten Pfählen meist die einzig zugängliche Stelle ist. Bei der Impulseinleitung entstehen verschiedene Wellenarten, beispielsweise Dehnungs-, Streuungs- und Biegewellen. Die Biegewellen werden zur Bestimmung der Pfahllänge herangezogen, da sie den größten Teil der durch den Stoß eingeleiteten Energie beinhalten. Da das Meßsignal aus mehreren Wellenarten besteht, kann die geometrieabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle nicht direkt aus dem Abstand der Beschleunigungsaufnehmer und der Durchlaufzeit ermittelt werden. Mit Hilfe der über Frequenztransformationen bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Biegewelle und den Laufzeitdifferenzen bezüglich der Pfahlkopf- und Pfahlfußreflexionen kann die Pfahllänge bestimmt werden [40].

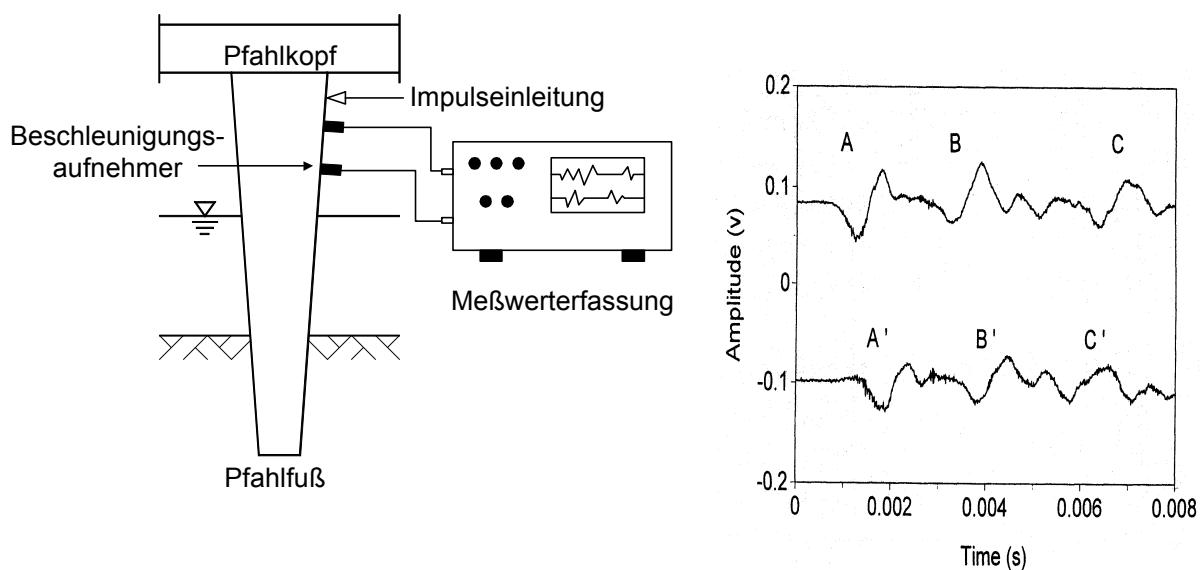


Abb. 2.11: Meßanordnung und Meßsignale [14], [40]

Da diese Geschwindigkeit für die Bestimmung der Gesamtlänge des Pfahles herangezogen wird, wirken sich starke Schwankungen der Integrität des Pfahles stark auf die ermittelte Länge aus. Bei Holzpfählen müssen zur Verbesserung der Aussagequalität die Beschleunigungsaufnehmer versetzt werden, um Abweichungen zu erkennen.

In Abb. 2.11 sind beispielhaft die Meßanordnung und die Meßsignale der beiden Beschleunigungsaufnehmer dargestellt.

Die Genauigkeit des Verfahrens zur Ermittlung der Einbindetiefe von Pfählen ist nicht sehr hoch. Abweichungen der ermittelten von der wirklichen Pfahllänge liegen im Bereich von 10 bis 20% [40]. Ungefähre Aussagen zur Beschaffenheit von Holzpfählen lassen sich mit der Methode jedoch ableiten [14].

Bewertung der Methoden

Die unterschiedlichen Aussagemöglichkeiten und Anwendungsgrenzen der beschriebenen Methoden zur Bestimmung der Pfahlintegrität zeigen ihre Bedeutung für die praktische Anwendbarkeit. Aufgrund der vergleichsweise großen Aussagemöglichkeiten bei einem geringen und wirtschaftlichen Meß- sowie Auswertungsaufwand ist das dynamische „low-strain“ Verfahren auf Basis der Reflexionsmethode von zentraler Bedeutung.

Sonderformen dieser Stoßprüfung wie das Austin Verfahren oder die hydroelektrische Spannungsmethode sollen auch die Prüfung bei Pfählen mit großem Durchmesser oder großer Länge ermöglichen, die mit der Standardstoßprüfung nicht erfaßt werden können.

Als aussagekräftigere Methode hat sich aber für derartige große Pfahlgeometrien, wie z.B. Großbohrpfähle, die Ultraschallmessung in der praktischen Anwendung durchgesetzt. Die Nachteile gegenüber der Reflexionsmethode bestehen in dem erheblich größeren Kosten- und Zeitaufwand. Weiterhin müssen bei der Ultraschallmessung Führungsrohre vorgesehen werden. Dadurch ist die flexible Auswahl und Anzahl der prüfbaren Pfähle stark eingeschränkt. Die Ultraschallmessungen erfolgen über den Pfahlquerschnitt in diskreten Tiefenstufen und nicht wie bei der Reflexionsmethode entlang der Pfahlachse. Entsprechend der Tiefenstufen ist es möglich, daß Fehlstellen, wie z.B. Risse, nicht erfaßt werden.

Weitere Sonderformen der Stoßprüfung, wie der seismische Paralleltest oder die Biegewellenmethode, dienen zur Untersuchung der Pfahllänge unter speziellen Gegebenheiten, bei denen die Standardstoßprüfung nicht anwendbar ist. Dementsprechend kommen die Methoden nur relativ selten zur Anwendung.

3 Theoretische Grundlagen der Integritätsprüfung

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits die Methode der dynamischen „low-strain“ Pfahlprüfung auf Basis der Reflexionsmethode vorgestellt. Die notwendigen theoretischen Grundlagen der hierbei vorliegenden dynamischen Vorgänge werden in diesem Kapitel erläutert. Neben den physikalischen Grundlagen werden die Grundlagen zur meßtechnischen Erfassung und zur numerischen Simulation der Stoßwellenausbreitung beschrieben.

3.1 Physikalische Grundlagen der Wellenausbreitung im Pfahl

Das dynamischen Verhalten, das bei der Integritätsprüfung auftritt, kann in Abhängigkeit der Pfahlgeometrie zur Grenzwellenlänge des Stoßimpulses unterschieden werden. Daher soll zunächst eine qualitative Einordnung der Dynamik erfolgen.

Einordnung der Dynamik

Bei großer Dauer, also geringem Frequenzgehalt des eingeleiteten Stoßimpulses im Vergleich zu der Pfahllänge und dem Durchmesser, stellt sich nach einer Einschwingphase bei idealisierter geringer Dämpfung ein Schwingungsvorgang ein (Abb. 3.1). Quantitative Verhältniswerte hierzu werden aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen in Kap. 4 erläutert.

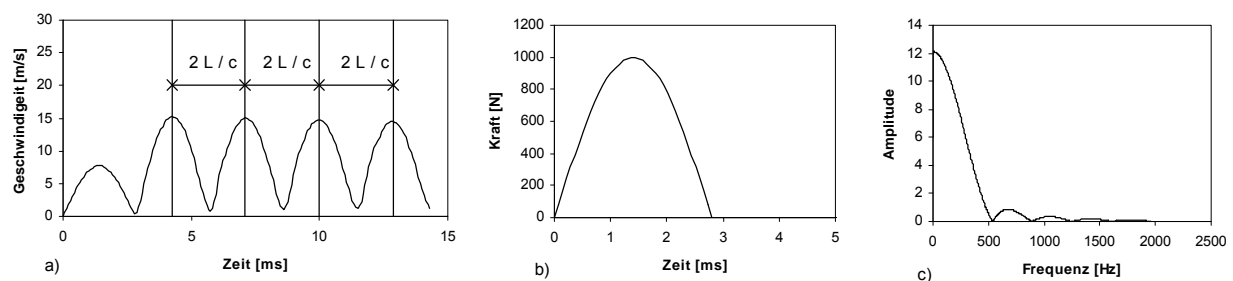


Abb. 3.1: Große Impulsdauer: a) Pfahlkopfgeschwindigkeit, b) Stoßimpuls, c) Frequenzgehalt des Stoßimpulses

Erst bei entsprechend kürzerer Dauer des Impulses, also größerem Frequenzgehalt, wird die Ausbreitung der Stoßwelle abgebildet (Abb. 3.2). Bei der Integritätsprüfung wird im Normalfall ein derartiges Wellenausbreitungsproblem angestrebt.

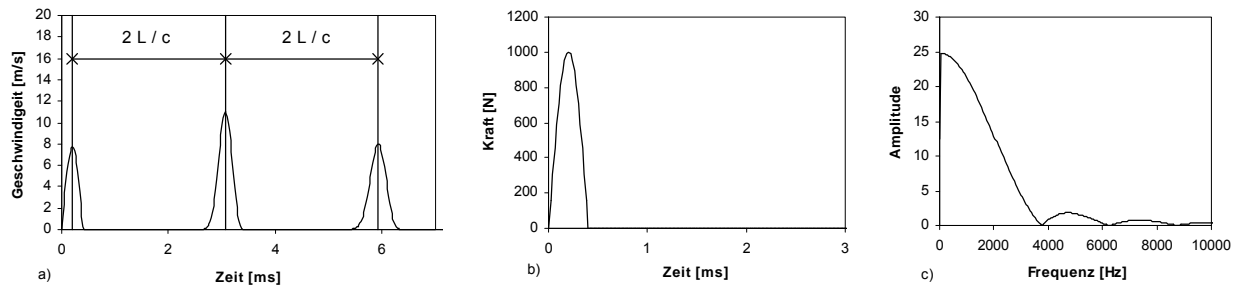


Abb. 3.2: Mittlere Impulsdauer; a) Pfahlkopfgeschwindigkeit, b) Stoßimpuls, c) Frequenzgehalt des Stoßimpulses

Erfolgt eine relativ zum Pfahldurchmesser sehr hochfrequente Anregung wird die axiale Wellenausbreitung im Pfahl durch Querschwingungen überlagert (Abb. 3.3).

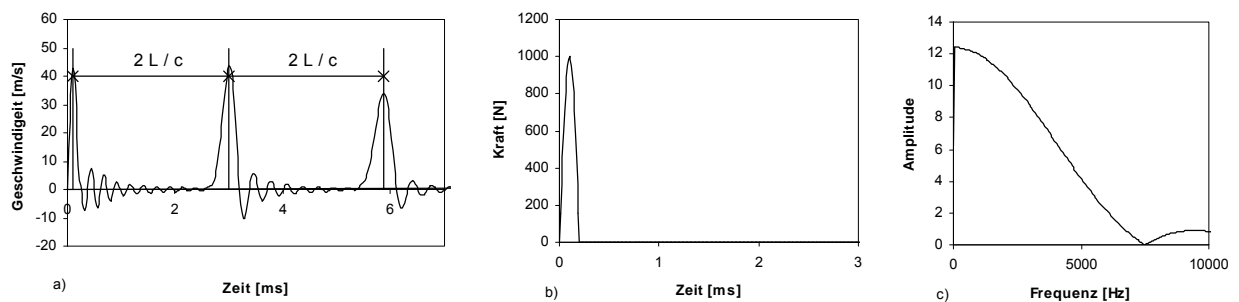


Abb. 3.3: Kurze Impulsdauer; a) Pfahlkopfgeschwindigkeit, b) Stoßimpuls, c) Frequenzgehalt des Stoßimpulses

Grundgleichungen der Wellenausbreitung

Unabhängig von der Einordnung des dynamischen Vorgangs kann dieser durch Grundgleichungen beschrieben werden. Die Kraftintensität der bei der Integritätsprüfung entstehenden Stoßimpulse ist sehr gering. Bei den daraus resultierenden sehr kleinen Verschiebungen kann bei der Ausbreitung auftretender mechanischer Wellen die lineare Elastizitätstheorie zugrunde gelegt werden [58]. Der dynamische Vorgang wird durch die Lamé - Naviersche - Bewegungsgleichung für ein homogenes, isotropes und linear elastisches Medium beschrieben:

$$(\lambda + \mu) u_{i,ij} + \mu u_{j,ii} + b_j = \rho \ddot{u}_j \quad (3.1)$$

mit den Lamé – Konstanten

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{und} \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.2)$$

dem Verschiebungsvektor u , dem Vektor für Volumenkräfte b , der Dichte des Mediums ρ ,

dem Elastizitätsmodul E und die Querkontraktionszahl ν . Die Volumenkräfte können nach [54] vernachlässigt werden. Die Herleitung der Bewegungsgleichung ist z.B. in [72] enthalten.

Raumwellen

Die Lamé-Konstanten werden in der Elastodynamik häufig durch die Wellengeschwindigkeiten ersetzt:

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \text{ bzw. } c_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3.3)$$

und

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \text{ bzw. } c_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (3.4)$$

In einem unendlich ausgedehnten Festkörper existieren nur zwei Arten von Raumwellen. Dieses ist die Kompressionswelle (P-Welle), die Verschiebungen in Ausbreitungsrichtung verursacht, und die Scherwelle (S-Welle), die Verschiebung quer zur Ausbreitungsrichtung bewirkt. Dabei entspricht c_p der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswelle und c_s beschreibt die Geschwindigkeit der Scherwelle. Die schnellere P-Welle erzeugt sowohl Volumen- als auch Formänderungen. Durch die S-Welle treten nur Formänderungen auf. Die Bewegungsgleichung (3.1) lässt sich mit den Gleichungen (3.3) und (3.4) wie folgt darstellen:

$$(c_p^2 - c_s^2)u_{i,ij} + c_s^2 u_{j,ii} + \frac{b_j}{\rho} = \ddot{u}_j \quad (3.5)$$

Dehnwelle

Betrachtet man nicht einen unendlich ausgedehnten Festkörper, sondern die Geometrie eines Pfahls, so sind Grenzflächen in Ausbreitungsrichtung vorhanden. Sind diese Grenzflächen bereits in kleinerem Abstand als die minimale Wellenlänge des Stoßimpulses vorhanden, entstehen Wellentypen, die sich von den beschriebenen Raumwellen unterscheiden. In Randnähe tritt eine verminderte Behinderung von Querverschiebungen auf. Dadurch können Deformationen in Ausbreitungsrichtung von stärkeren Deformationen in dazu senkrechten Ebenen begleitet sein. Die in einem Körper auftretenden Wellen enthalten Verschiebungskomponenten in Längs- und Querrichtung. Eine derartige typische Mischwelle ist die Dehnwelle in unendlich langen, stabförmigen Strukturen. Es liegt eine Begrenzung der Struktur in zwei Dimensionen vor. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der eindimensionalen Dehnwelle beträgt:

$$c_D = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3.6)$$

Die Dehnwellengeschwindigkeit ist somit geringer als die Kompressionswellengeschwindigkeit.

keit. Die Reduzierung kann anschaulich mit einer Verminderung der Steifigkeit bei nicht gehinderter Seitendehnung an den Grenzflächen erklärt werden.

Für die eindimensionale Betrachtung der Dehnwelle in einem Stab kann die Bewegungsgleichung (3.5) unter Vernachlässigung der Volumenkräfte vereinfacht werden:

$$c_D^2 u_{,xx} = \ddot{u} \quad (3.7)$$

Diese Wellengleichung gilt für den freien, unendlich langen Dehnstab mit konstantem Querschnitt. Für diese Differentialgleichung existiert die analytische Lösung nach d'Alembert:

$$u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (3.8)$$

Die Funktion f beschreibt eine Welle, die sich mit der Geschwindigkeit $c = c_D$ ungestört in positiver x -Richtung bewegt, und g eine Welle, die sich analog in Gegenrichtung ausbreitet. Eine ausführliche Herleitung ist z.B. in [65] zu finden.

Wellenausbreitung im Pfahl-Boden-System

Die bei der Integritätsprüfung auftretende Wellenausbreitung im Pfahl wird wie beschrieben durch einen Stoßimpuls angeregt. Die punktuelle Belastung am Pfahlkopf erzeugt eine Spannungswelle, die sich zunächst halbkugelförmig im Pfahlkopfbereich ausbreitet. Die resultierende Welle besteht im wesentlichen aus Anteilen der P- und der S-Welle. Bei ausreichend schlanken Pfählen, bei denen die minimale Stoßwellenlänge größer als der Pfahldurchmesser ist, tritt in Anlehnung an das Prinzip von St. Venant in einem Abstand von ca. dem zweifachen Pfahldurchmesser eine Dehnwelle mit einer ebenen Wellenfront auf. Um radiale Trägheitswirkungen auszuschließen, wird nach [5] ein Verhältnis der Pfahllänge L zum Durchmesser d von $L/d = 10$ gefordert. Bei entsprechender Impulsanregung und Pfahlgeometrie kann also vereinfacht die eindimensionale Wellengleichung (3.7) mit der Dehnwellengeschwindigkeit (3.6) zugrunde gelegt werden. Dieses gilt aber nur für einen freien ungedämpften Stab, bei dem die Pfahlmaterialdämpfung und die Interaktion mit dem umgebenden Boden vernachlässigt werden.

Die Wellenausbreitung ist eine Form des Energietransportes. Die kleinsten Materialeinheiten schwingen und tauschen bei Kollision Energie aus. Durch die Wellenbewegung wird ein Teil der Bewegungsenergie in andere Energieformen umgewandelt. Das „System Stab“ gibt Energie ab, wodurch sich die Teilchengeschwindigkeit verringert. Dieser Vorgang wird als innere Dämpfung oder Materialdämpfung bezeichnet. Für die Berücksichtigung der Materialdämpfung des Pfahles durch eine angenommene linear viskose Dämpfung mit einer Viskosität η_p gilt [6]:

$$\sigma = E u_{,x} - \eta_p \dot{u}_{,x} \quad (3.9)$$

Neben der Materialdämpfung ist die Interaktion des Pfahls mit dem umgebenden Bodenmedium zu betrachten. Hierbei ist zwischen einer statischen und einer dynamischen Wirkung zu unterscheiden [6].

Wird ein Pfahl belastet, so treten infolge des Energieeintrags neben elastischen Stauchungen im Pfahl auch Relativverschiebungen zwischen Pfahl und Umgebungsmedium auf. Der Boden setzt diesen Verschiebungen entlang des Pfahlschafts und an der Pfahlspitze Widerstand entgegen. Der Anteil des Bodenwiderstands, der von der Verschiebung u abhängig ist, wird als statische Wirkung bezeichnet. Derartige Verschiebungen sind im betrachteten Fall der Integritätsprüfung so gering, daß nur vernachlässigbar kleine elastische Verschiebungen auftreten.

Gegenüber der geringen statischen Wirkung ist bei der Stoßbelastung einer Integritätsprüfung die dynamische Wirkung in Abhängigkeit von Teilchengeschwindigkeit und Beschleunigung von großer Bedeutung. Das Umgebungsmedium wirkt entlang der Mantelfläche und am Pfahlfuß dämpfend. Es kommt in Abhängigkeit der Bodeneigenschaften zu einer erheblichen Amplitudenabnahme der Welle. Die Energieabstrahlung in das Umgebungsmedium wird als äußere Dämpfung bezeichnet. Generell sind hierbei die dissipative Dämpfung und die Abstrahldämpfung zu unterscheiden wie in Abb. 3.4 verdeutlicht wird.

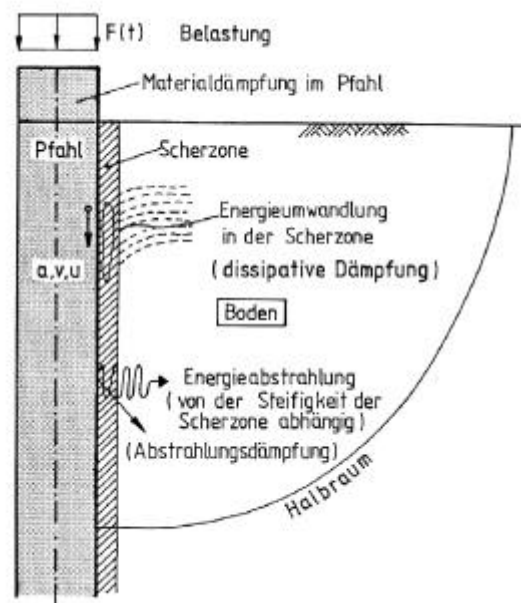


Abb. 3.4: Dämpfungsvorgänge bei der Wellenausbreitung im Pfahl [6]

Die dissipative Dämpfung im Boden ist auf Reibungs- und Schervorgänge in der Scherzone am Pfahlmantel zurückzuführen. Im vorliegenden Fall der Integritätsprüfung wird angenommen, daß ein quasi viskoser Schubwiderstand wirkt [53].

Die Abstrahldämpfung stellt eine geometrische Dämpfung der Wellen im Halbraum dar. Nach [6] entspricht diese einem Energietransport vom Pfahl in das umgebende Medium

ausschließlich durch sich senkrecht zum Pfahlmantel ausbreitende Scherwellen.

Der am Pfahlmantel und an der Pfahlspitze wirkende statische und dynamische Bodeneinfluß kann vereinfacht nach [6] durch den Ansatz wegabhängiger Federkräfte und geschwindigkeitsabhängiger Dämpfungskräfte berücksichtigt werden:

$$dF = k' u_{,x} + b' \dot{u}_{,x} \quad (3.10)$$

Hierbei entspricht k' der Ersatzfedersteifigkeit und b' der Viskosität des vereinfacht angenommenen Bodeneinflusses. Die um den Einfluß des Bodens und der Pfahlmaterialdämpfung erweiterte Wellengleichung ergibt sich aus den Gleichungen (3.7), (3.9) und (3.10) zu [6]:

$$\ddot{u} = -\frac{k'}{A\rho} u - \frac{b'}{A\rho} \dot{u} + \frac{E}{\rho} u_{,xx} + \frac{\eta_p}{\rho} \dot{u}_{,x} \quad (3.11)$$

Es existieren analytische Lösungen dieser Differentialgleichung (vgl. [65] [53] [6]). Die genaue Betrachtung eines Pfahles zeigt, daß weder die Annahme der Materialhomogenität, noch die Annahme eines konstanten Querschnitts sowie eines konstanten Bodeneinflusses die Realität widerspiegelt. Der Pfahl muß in Abschnitte gleicher Materialeigenschaften diskretisiert werden. Notwendige Koeffizienten müssen mit großem Aufwand empirisch ermittelt werden. Eine physikalisch-mathematische Beschreibung der Wellenausbreitung ist daher nur in Form einer Näherungslösung praktikabel [53]. Auf die Grundlagen einer numerischen Näherungslösung wird in Kap. 3.3 eingegangen.

Einfluß von Impedanzänderungen

Die eindimensionale Wellengleichung (3.7) gilt für den freien, unendlich langen Dehnstab mit konstantem Querschnitt. Ein Pfahl ist jedoch ein endlicher Körper, bei dem die Wellenausbreitung durch die Pfahlenden beeinflusst wird. Eine Beeinflussung findet aber nicht nur am Pfahlkopf und -fuß statt, sondern bei jeder Impedanzänderung, also bei Querschnitts- oder Materialänderung entlang des Pfahlschafts. Querschnittsfläche, Elastizitätsmodul und Dichte bestimmen die Impedanz Z :

$$Z = A\sqrt{E\rho} = \frac{EA}{c_D} \quad (3.12)$$

Betrachtet man zur Deutung der Impedanz die analytische Lösung nach d'Alembert (3.8) der Wellengleichung (3.7), erfolgt anschaulich eine Aufteilung der Wellenanteile in eine ungestörte Welle in positiver x -Richtung mit der Funktion f und analog in Gegenrichtung mit der Funktion g . Wird nur die einseitige Funktion f betrachtet, kann nach [98] auf die Proportionalität von Kraft F und Teilchengeschwindigkeit v mit Hilfe der Impedanz Z geschlossen werden:

$$F = Z v \quad (3.13)$$

Für den endlichen Pfahl treten Beeinflussungen der Wellenausbreitung am Pfahlfuß und –kopf bzw. bei jeder Impedanzänderung in Form von Reflexionen auf. Für den Fall, daß die Funktion g ungleich Null ist, sind die abwärtsgerichteten Teilwellen (Index i) und die aufwärtsgerichteten, reflektierten Wellenanteile (Index r) zu unterscheiden. Die resultierende Teilchengeschwindigkeit ergibt sich nach [98] aus der Summierung der Wellenanteile:

$$F = Z(v_i - v_r) \text{ bzw. } v = \frac{1}{Z}(F_i - F_r) \quad (3.14)$$

Eine ausführliche Herleitung ist z.B. in [6] zu finden.

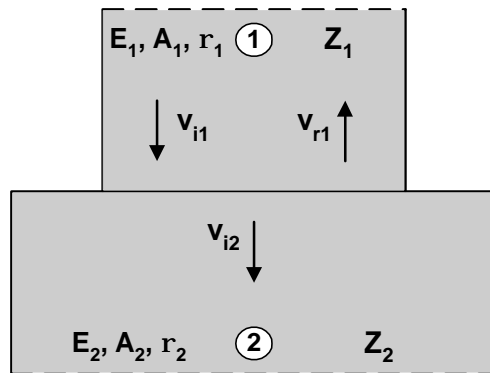


Abb. 3.5: Übergangsbedingung bei Impedanzwechsel

Liegt eine Impedanzänderung vor (Abb. 3.5), d.h. eine Sprungstelle zwischen Pfahlabschnitten unterschiedlicher Impedanz, sind Übergangsbedingungen der Kraft und der Teilchengeschwindigkeit zu erfüllen:

$$v = v_{i1} + v_{r1} = v_{i2} + v_{r2} \text{ und } F = Z_1(v_{i1} - v_{r1}) = Z_2(v_{i2} - v_{r2}) \quad (3.15)$$

Aus den Übergangsbedingungen (3.15) ergibt sich mit dem Reflexionsfaktor r :

$$r = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.16)$$

und dem Transmissionsfaktor t :

$$t = 1 + r \quad (3.17)$$

die Teilchengeschwindigkeit der reflektierten und der transmittierten Wellenanteile:

$$v_{r1} = r v_{i1} \text{ und } v_{i2} = t v_{i1} \quad (3.18)$$

Mit Hilfe des Reflexionsfaktors r ergibt sich die Beziehung zwischen den Impedanzen:

$$Z_2 = \frac{1-r}{1+r} Z_1 \quad (3.19)$$

Bei Impedanzänderung lassen sich die beiden Grenzbedingungen freies und starres Stabende unterscheiden. Für das freie Ende gilt:

$$Z_2 = 0, \quad \frac{Z_1}{Z_2} = \infty \Rightarrow r = 1, \quad t = 2 \quad (3.20)$$

Dieses bedeutet anschaulich, daß am freien Ende eine Druckwelle als Zugwelle reflektiert wird und umgekehrt [35]. Am freien Ende ist somit die Spannungsamplitude Null, und die Amplitude der Teilchengeschwindigkeit springt auf den doppelten Betrag. Nach der Reflexion behält die Geschwindigkeit ihr Vorzeichen bei. Hingegen gilt für das starre Ende:

$$Z_2 = \infty, \quad \frac{Z_1}{Z_2} = 0 \Rightarrow r = -1, \quad t = 0 \quad (3.21)$$

Am starren Ende wird eine Druckwelle als Druckwelle reflektiert. Es tritt ein Sprung auf die doppelte Amplitude des Spannungsimpulses auf, und die Teilchengeschwindigkeit ist hierbei Null. Nach der Reflexion wechselt die Geschwindigkeit ihr Vorzeichen. Die hervorgerufene Querschnittsverschiebung verhält sich am starren und am freien Ende proportional zur Teilchengeschwindigkeit.

Für die elastische Lagerung am Pfahlfuß stellt sich ein Zustand zwischen den Grenzbedingungen ein. Generell zeigt die langjährige Durchführung von Integritätsprüfungen, daß bei einer Reflexion am Pfahlfuß der Reflexionsfaktor r nicht kleiner Null ist.

Für eine Impedanzänderung entlang des Pfahlschafts gilt:

$$\text{Impedanzvergrößerung:} \quad Z_1 < Z_2 \Rightarrow -1 < r < 0, \quad 0 < t < 1 \quad (3.22)$$

$$\text{Impedanzverringern:} \quad Z_1 > Z_2 \Rightarrow 0 < r < 1, \quad 1 < t < 2 \quad (3.23)$$

Die beschriebenen Gesetzmäßigkeiten bei Impedanzänderungen basieren auf der Lösung (3.8) der eindimensionalen Wellengleichung (3.7). Hierbei werden die Pfahlmaterialdämpfung und der Bodeneinfluß vernachlässigt. Der auftretende Dämpfungseinfluß bewirkt nach (3.11) eine Reduzierung der Teilchengeschwindigkeitsamplitude. Soll die bei einer Messung erfaßte Impedanzänderung mit den beschriebenen Gesetzmäßigkeiten beurteilt werden, kann der Dämpfungseinfluß vereinfacht angenommen werden. Nach [32] kann aus dem Geschwindigkeitsverlauf ein Dämpfungsparameter D [1/m] bestimmt werden. Hierzu wird die gemessene Teilchengeschwindigkeit des Eingangsimpulses v_E [m/s] und des Fußreflexes v_{FR} [m/s] am Pfahlkopf sowie die Pfahllänge L [m] herangezogen:

$$(1-D)^{2L} = \frac{v_{FR}}{2 v_E} \quad (3.24)$$

Da am Pfahlkopf aufgrund der Reflexionsbedingung am freien Ende nach Gleichung (3.20) ein Sprung auf die doppelte Teilchengeschwindigkeit v_{FR} eintritt, muß die Geschwindigkeit v_E des Eingangsimpulses in (3.24) verdoppelt werden, um die Dämpfung zu berechnen. Tritt eine Impedanzänderung entlang des Pfahlschafts auf, wird diese durch entsprechende Reflexionspeaks erfaßt. Um die Größe der Impedanzänderung nach (3.19) näherungsweise zu bestimmen, muß der Dämpfungseinfluß mit dem Dämpfungsparameter D berücksichtigt werden. Die Teilchengeschwindigkeit des Reflexionspeaks wird hierzu mit dem Korrekturfaktor k multipliziert und ist somit quasi „dämpfungsfrei“:

$$k = \frac{1}{(1-D)^{2L_R}} \quad (3.25)$$

Die Tiefenlage der Fehlstelle unterhalb des Pfahlkopfes L_R kann über die Laufzeitmessung des Geschwindigkeitssignals bestimmt werden. Somit kann mit Hilfe der Reflexionspeaks im Geschwindigkeitsverlauf die Lage unterhalb des Pfahlkopfs, die Ausdehnung entlang des Pfahlschafts und die Größe der Impedanzänderung beurteilt werden.

Impulseinleitung

Um Impedanzänderungen aufgrund von reflektierten Wellenanteilen beurteilen zu können, ist der eingeleitete Stoßimpuls von entscheidender Bedeutung. Wie in Kapitel 2 beschrieben, begrenzt die Art des Stoßimpulses die interpretierbare Fehlstellenabmessung bzw. die Größe der Impedanzänderung. Ideal ist ein möglichst kurzer Stoß mit hoher Kraftintensität.

Im folgenden werden grundlegende Zusammenhänge des Stoßvorgangs erläutert. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen zur Impulseinleitung sind in Kapitel 4 zu finden.

Ein Beispiel für einen gemessenen Stoßimpuls und dessen Frequenzspektrum ist in Abb. 3.6 gegeben. Der Stoßimpuls wird durch die Dauer t_c , durch seine Kraftamplitude sowie den Kraftverlauf charakterisiert.

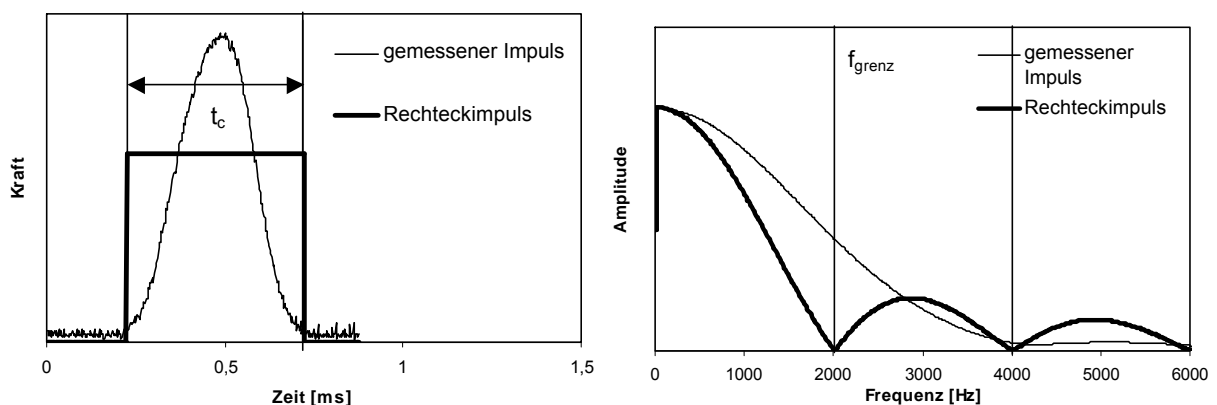


Abb. 3.6: Stoßimpuls

Ein Stoßimpuls enthält im Gegensatz zu einer harmonischen Anregung keine diskrete Frequenz, sondern ein kontinuierliches Frequenzspektrum. Dieses Spektrum ist in Abhängigkeit von Impulsform und –dauer t_c begrenzt [62]. Die auftretende Impulsform ist nicht einheitlich. Die Form kann näherungsweise als Sinushalbwellen betrachtet werden. Der maximale Frequenzgehalt ist abhängig von der Impulsform und wird durch die sogenannte Grenzfrequenz f_{Grenz} definiert [62]. Für einen Rechteckimpuls ist die ausgeprägte Nullstelle des Frequenzspektrums bei $f_{\text{Grenz}} = 1/t_c$. Liegt keine sprungartige Anregung vor, befindet sich die Nullstelle in einem Bereich bis $f_{\text{Grenz}} = 2/t_c$ (Abb. 3.6). Die Amplitudendichte ist hierbei im Frequenzbereich zwischen $1/t_c$ und $2/t_c$ gering. Für die folgenden Betrachtungen wird daher die Grenzfrequenz angenähert mit:

$$f_{\text{Grenz}} = \frac{1}{t_c} \quad (3.26)$$

Aus der Grenzfrequenz (3.26) ergibt sich mit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (3.6) die Grenzwellenlänge λ_{Grenz} :

$$\lambda_{\text{Grenz}} = \frac{c_D}{f_{\text{Grenz}}} \quad (3.27)$$

Die Dauer bzw. der Frequenzgehalt und die Grenzwellenlänge sowie die Kraftamplitude des Stoßimpulses werden durch die Art der Einleitung bestimmt. Bei der Integritätsprüfung wird in der Regel der Stoß mit einem speziellen Impulshammer in die Pfahlkopfoberfläche eingeleitet. Impulshämmer unterscheiden sich durch ihr Gewicht sowie durch Größe und das Material der Schlagkappe. Die Oberfläche des Pfahles weist in Abhängigkeit der Pfahlherstellung schwankende Materialeigenschaften auf, was Einfluß auf die Impulseinleitung hat.

Um die qualitativen Zusammenhänge des Stoßvorgangs zu beschreiben, wird vereinfacht der gerade zentrische Stoß eines kugelförmigen elastischen Stoßkörpers gegen einen kugelförmigen, elastischen Prallkörper betrachtet. Dabei werden die Oberflächen beider Körper als ideal glatt angenommen. Um die Stoßkraft und Stoßzeit zu beschreiben, wird die Theorie nach Hertz herangezogen [95]. Hierbei steht der Index 1 für den kugelförmigen Stoßkörper und der Index 2 für den Prallkörper. Zur Berechnung der Stoßkraft $P_{s,H_{\max}}$ ist zunächst die Kenngröße α zu ermitteln, welche die Materialeigenschaften und die Geometrie der Körper berücksichtigt:

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{9}{64} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \left[\frac{1 - \nu_1}{G_1} + \frac{1 - \nu_2}{G_2} \right]^2} \quad (3.28)$$

mit dem Durchmesser R der Körper, der Querkontraktion ν und dem Schubmodul G . Die Gleichung für die Stoßkraft lautet damit:

$$P_{s,H_{\max}} = \left[\frac{5}{4} \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2) \alpha} (v_1 - v_2)^2 \right]^{\frac{3}{5}} \quad (3.29)$$

mit der Masse der Körper m und der Stoßgeschwindigkeit v . Nach Hertz berechnet sich die Stoßdauer $T_{S,Hmax}$ zu:

$$T_{S,Hmax} = 2,9432 R_1 R_2 \sqrt{\frac{25}{64} \pi^2 \frac{\rho_1^2 \rho_2^2}{v_1 - v_2} \frac{R_1 + R_2}{(R_1^3 \rho_1 + R_2^3 \rho_2)^2} \left[\frac{1 - \nu_1}{G_1} + \frac{1 - \nu_2}{G_2} \right]^2} \quad (3.30)$$

mit dem Durchmesser R der Körper, der Dichte ρ , der Stoßgeschwindigkeit v , der Querkontraktion ν und dem Schubmodul G . Nach [86] kann die Formel zur Bestimmung der Stoßzeit (3.30) vereinfacht werden. Betrachtet wird hierbei der Stoß mit Erdbeschleunigung zwischen einer Stahlkugel vom Durchmesser d [m] und einer ebenen Betonoberfläche mit konstanten Materialeigenschaften. Nach [86] gilt für die Stoßdauer t_c :

$$t_c = \frac{0,0043 d}{h^{0,1}} [s] \quad (3.31)$$

mit der Fallhöhe h [m] der Kugel. Für relevante Fallhöhen zwischen 0,2 bis 4,0 m liegt der Wert $h^{0,1}$ zwischen 0,85 und 1,15. Somit hat die Fallhöhe nur geringen Einfluß und für die Stoßzeit ergibt sich näherungsweise [86]:

$$t_c = 0,0043 d [s] \quad (3.32)$$

Mit den Gleichungen (3.28) bis (3.31) wird der Zusammenhang zwischen der Dauer sowie der Kraftamplitude des Stoßes und den verwendeten Impulseinleitungen in Kap. 4 qualitativ beurteilt.

3.2 Meßtechnische Erfassung der Wellenausbreitung im Pfahl

Im folgenden Kapitel wird die meßtechnische Erfassung der Wellenausbreitung erläutert. Die Wellenausbreitung wird durch einen Stoßimpuls mit einem speziellen Impulshammer an der Pfahlkopfoberfläche erzeugt. Die Ausbreitung der Stoßwelle wird bei der Standardprüfung mit einem Beschleunigungsaufnehmer an der Pfahlkopfoberfläche erfaßt. Wie im Kapitel 2.3 erläutert, wurden für die Durchführung der Integritätsprüfung von verschiedenen Herstellern, wie z.B. PDI oder TNO, spezielle baustellentaugliche Meßsysteme entwickelt. Eine derartige Meßeinrichtung besteht neben dem Meßaufnehmer aus einem für den Aufnehmer abgestimmten Meßverstärker, einem Impulshammer, einem A/D-Wandler und einer Steuerung inkl. Speichermedium mit der Möglichkeit einfacher Meßanalysen. Die Einflußfaktoren auf die Komponenten der Meßeinrichtung und die resultierenden Anforderungen werden in Kapitel 4 untersucht. Um dieses zu beurteilen, werden zunächst die Wirkungsprinzipien der Komponenten vorgestellt.

Meßaufnehmer

Zur Erfassung der auftretenden hochfrequenten dynamischen Vorgänge eignen sich u.a. piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer. Diese Aufnehmer enthalten ein Piezoelement in Form eines Einkristalls aus einem nichtleitenden Stoff, wie z.B. Quarz. Ausgenutzt wird hierbei der Piezoeffekt, d.h. bei mechanischen Beanspruchungen entstehen an bestimmten Stellen der Oberfläche des Piezoelementes elektrische Spannungen [60]. Neben dem Piezoelement besteht ein Aufnehmer aus einer seismischen Masse und einem Gehäuse mit einer Grundplatte (Abb. 3.7).

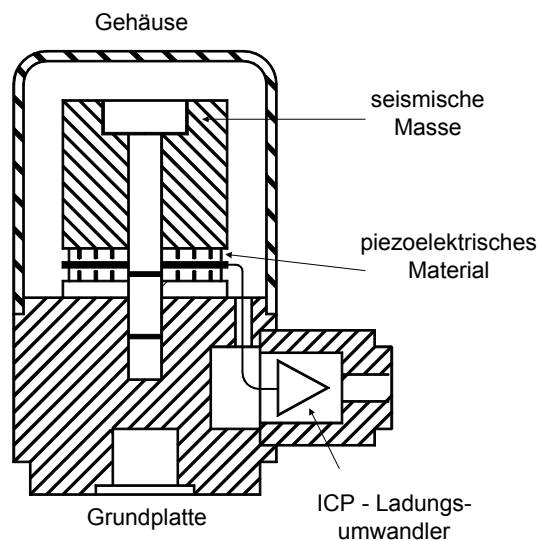


Abb. 3.7: Aufbau eines piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmers [70]

Unter der Annahme, daß die Beschleunigung der seismischen Masse proportional zu der auf sie einwirkenden Kraft ist, läßt sich die Beschleunigungsmessung auf eine Kraftmessung zurückführen. Es wird die Trägheitskraft der seismischen Masse gemessen, die sie auf das Piezoelement ausübt, wenn die Grundplatte des Aufnehmers beschleunigt wird. Die Konstruktionsform des Aufnehmers in Abb. 3.7 wird als Kompressionstyp bezeichnet. Weitere Konstruktionsformen sind in [73] beschrieben. Die Art der Wandlung des Ladungssignals in ein Spannungssignal kann unterschiedlich erfolgen. Findet die Wandlung in einem Ladungsmeßverstärker statt, sind für eine störungsfreie Messung hochisolierte Spezialkabel zwischen Aufnehmer und Verstärker erforderlich. Neuere Aufnehmertypen, wie z.B. die „Integrated Circuit Piezoelectric“ Aufnehmer (ICP) (Abb. 3.7), enthalten einen Ladungswandler direkt im Aufnehmer. Dieser Aufnehmertyp wird bei den meisten Meßsystemen zur Integritätsprüfung verwendet.

Die bei der Integritätsprüfung auftretende Stoßwelle wird, wie in Kap. 3.1 erklärt, durch die Größe der Kraft- bzw. Beschleunigungsamplitude und durch das resultierende Frequenzspektrum charakterisiert. Es muß gewährleistet sein, daß der verwendete Aufnehmer einen entsprechenden Meßbereich hat und das auftretende Frequenzspektrum

abbilden kann. Beschleunigungsaufnehmer sind leicht gedämpfte Schwingungssysteme, die durch ein Feder-Masse-Dämpfer-Ersatzsystem beschrieben werden können (Abb. 3.8).

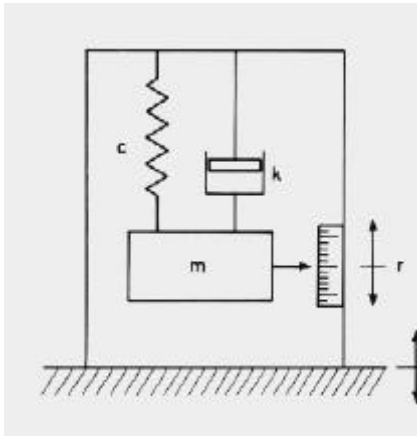


Abb. 3.8: Ersatzsystem eines Aufnehmers mit seismischer Masse [60]

Die Resonanzüberhöhung bei der Eigenfrequenz f_0 solcher Systeme begrenzt den für die Messung nutzbaren Frequenzbereich durch die obere Grenzfrequenz f_{g0} . Der nutzbare Frequenzbereich erstreckt sich in einem Bereich bis $f_{g0} \leq 0,3 f_0$ [60]. In diesem Bereich überschreitet die Amplitudenüberhöhung nicht eine vorgegebene Fehlergrenze.

Bei dynamischen Messungen ist die Anbringung des Aufnehmers an das Meßobjekt, im vorliegenden Fall die Anbringung an die Pfahlkopfoberfläche, von besonderer Bedeutung [36]. Bei unzureichender Befestigung des Aufnehmers kann die Messung u.U. erheblich beeinflusst werden [83]. Auch die Eigenfrequenz des Systems Aufnehmer-Meßobjekt und damit der nutzbare Frequenzbereich wird durch die Ankopplung des Aufnehmers verändert. Zur Übertragung beliebiger Frequenzbereiche wäre eine vollkommen starre Ankopplung erforderlich, die nicht realisierbar ist. Die Ankopplung bei der Integritätsprüfung mit einer Betonoberfläche ist aufgrund der Materialeigenschaften des Betons problematisch. Der Pfahlkopf muß für die Meßdurchführung vorbereitet werden. Die Oberfläche ist in dem Bereich der Meßaufnehmeranbringung zu ebenen und von Beton geringer Festigkeit zu befreien. Die Untersuchung verschiedener Anbringungsarten wird in Kapitel 4 vorgestellt.

Meßverstärker

Das erzeugte elektrische Signal der meisten Meßaufnehmer zur elektrischen Messung mechanischer Größen ist sehr klein, so daß es mit einem Meßverstärker vergrößert werden muß. Zusätzlich dienen Meßverstärker häufig auch zur Speisung von speziell abgestimmten Meßaufnehmern. Für die bei der Integritätsprüfung häufig verwendeten ICP-Beschleunigungsaufnehmer (Abb. 3.8) existieren derartige Gleichspannungsmeßverstärker. Die Unterscheidungen der verschiedenen Verstärkerarten sind z.B. in [73] und [60] dokumentiert. Für die Messung eines dynamischen Vorgangs werden die Anforderungen an den Meßverstärker im wesentlichen durch den übertragbaren Frequenzbereich, die Phasenlaufzeit und die Anstiegszeit bestimmt [73].

A/D-Wandler

Der Meßverstärker liefert ein analoges Signal in Form einer Spannung. Dieses analoge Spannungssignal wird im A/D-Wandler in ein Signal mit einer diskreten Anzahl von Werten digitalisiert. Hieraus ergibt sich die Hauptanforderung an den A/D-Wandler in Form der Abtastrate bzw. der Abtastfrequenz. Es muß gewährleistet sein, daß der Frequenzgehalt des dynamischen Vorganges mit der möglichen Abtastfrequenz erfaßt werden kann und das analoge Signal ohne Informationsverlust zurückgewonnen werden kann [44].

Steuerung - Speichermedium

Nachdem der A/D-Wandler das Meßsignal digitalisiert hat, erfolgt die Speicherung oder Anzeige. Hierzu kann ein entsprechend der Aufgabe konfigurierter Meßcomputer dienen. Dieser übernimmt ebenfalls die Steuerung der Messung sowie evtl. eine einfache Meßanalyse [28].

Impulshammer

Der Impulshammer dient der Stoßwellenerzeugung. Wenn es von Interesse ist, den eingeleiteten Stoßimpuls zu erfassen, wird z.B. bei der Mobilitätsanalyse im Frequenzbereich ein meßtechnisch bestückter Impulshammer verwendet. Hierbei kommen piezoelektrische Kraft- oder Beschleunigungsaufnehmer zum Einsatz. Bei der Verwendung von Kraftaufnehmern werden diese direkt mit der Schlagkappe des Hammers gekoppelt [70].

3.3 Simulation der Wellenausbreitung im Pfahl

Die Wellenausbreitung im Pfahl bei der Integritätsprüfung wird durch die in Kap. 3.1 beschriebenen Faktoren beeinflusst. Um diese Einflüsse zu untersuchen, werden im Rahmen dieser Arbeit neben Messungen auch Simulationsberechnungen durchgeführt. Zusätzlich zur Simulation, d.h. der direkten Berechnung der Wellenausbreitung, wird in Kap. 7.4 die Auswertung in Form einer Meßsignalidentifikation untersucht. Die Grundlagen der verwendeten Berechnungsmodelle werden im folgenden erläutert.

Modellbildung

Die Modellbildung für eine dynamisch belastete Struktur besteht aus einer Reduzierung des physikalischen kontinuierlichen Systems auf eine mathematisch diskrete Idealisierung. Wie stark ein System abstrahiert werden kann, hängt vom dynamischen Vorgang ab, der simuliert werden soll. Eine Einordnung der bei der Stoßwellenausbreitung resultierenden Dynamik wird in Kap. 3.1 vorgestellt. Der Frequenzgehalt des eingeleiteten Stoßimpulses gegenüber der Pfahlgeometrie ist für die Wellenausbreitung und somit für die Modellbildung wesentlich.

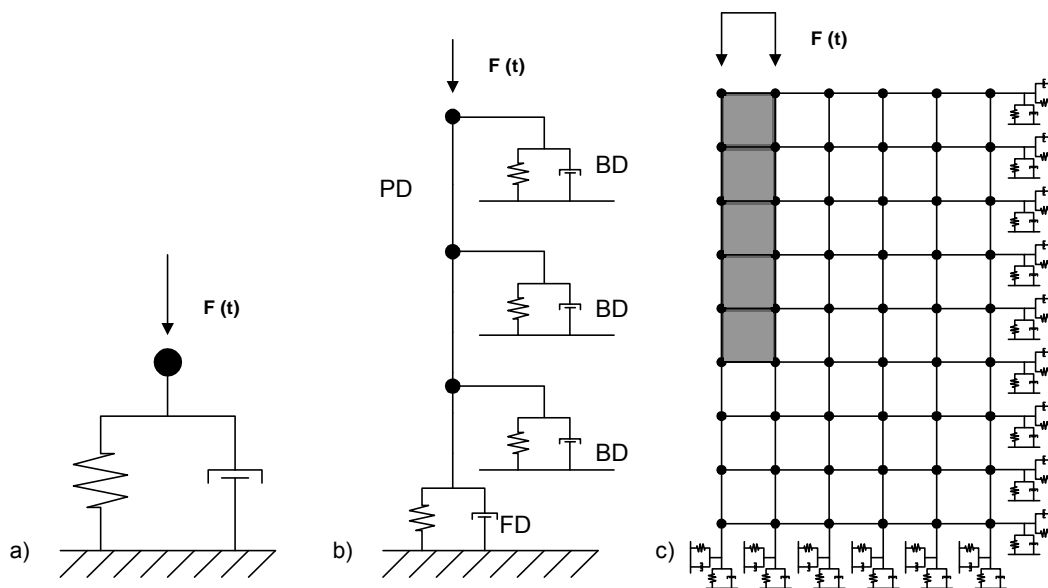


Abb. 3.9: Modellbildung in Abhängigkeit des dynamischen Vorgangs

Stellt sich in Abhängigkeit eines geringen Frequenzgehalts im Verhältnis zur Pfahlgeometrie ein Schwingungsvorgang ein (Abb. 3.1), kann der Pfahl stark vereinfacht als Masse-Feder-Dämpfer-System (Abb. 3.9 a) betrachtet werden. Im vorliegenden Fall soll die Ausbreitung einer Stoßwelle mit entsprechendem Frequenzgehalt (Abb. 3.2) abgebildet werden. Hierzu ist die Idealisierung des Pfahles als Dehnstab erforderlich (Abb. 3.9 b). Der Bodeneinfluß wird durch die Kopplung des Dehnstabs mit Feder-Dämpfer-Elementen berücksichtigt. Derartige Modelle werden auch zur Bestimmung der Pfahltragfähigkeit mit dynamischen Prüfmethoden herangezogen [26] und sind von dem ursprünglichen Pfahlmodell nach Smith abgeleitet [91]. Überlagert sich infolge einer hochfrequenten Anregung die axiale Wellenausbreitung im Pfahl mit Querschwingungen (Abb. 3.3), ist die Betrachtung eines Dehnstabs nicht mehr ausreichend [74]. Wenn mehrdimensionale Effekte erfaßt werden sollen, ist beispielsweise eine rotationssymmetrische Idealisierung möglich (Abb. 3.9 c). Damit keine Wellenreflexionen an der Berandung des rotationssymmetrischen Modells auftreten, ist ein nichtreflektierender Rand erforderlich. Dies kann durch die Kopplung mit Feder-Dämpfer-Elementen, mit infiniten Elementen [75] oder mit der Randelementmethode [4] realisiert werden.

Das Verhältnis von Frequenzgehalt des Stoßimpulses zur Pfahlgeometrie ist für die Integritätsprüfung so anzustreben, daß sich eine axiale Wellenausbreitung im Pfahl einstellt (Abb. 3.2). Daher erfolgt bei den grundlegenden Berechnungen der vorliegenden Arbeit eine Idealisierung des Pfahls als Dehnstab (Abb. 3.9 b). Für die Untersuchung mehrdimensionaler Effekte werden rotationssymmetrische Modelle verwendet.

Berechnungsverfahren

Zur numerischen Näherungslösung der Differentialgleichung, die dem idealisierten mechanischen Modell zugrunde liegt, wird die Finite-Element-Methode (FEM) angewendet.

Zur Aufstellung der Gleichgewichtsbedingungen wird bei der FEM von Energieprinzipien ausgegangen [1]. Die Anwendung der Methode zur Lösung strukturmechanischer Probleme ist ausführlich in [7] und [106] beschrieben. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Berechnung mit dem FE-Programmsystem ANSYS durchgeführt [3].

Wahl des Elementtyps

Entsprechend der Idealisierung wird für das eindimensionale Modell ein ebenes Stabelement mit linearen Ansatzfunktionen gewählt. Das axiale Element besteht aus zwei Knoten mit je zwei translatorischen Freiheitsgraden und kann nur in Richtung der Achse belastet werden. Zur Simulation des Bodeneinflusses erfolgt eine Kopplung mit Feder-Dämpfer-Elementen. Hierbei handelt es sich ebenfalls um axiale Elemente mit zwei Knoten.

Für das räumliche Modell werden rotationssymmetrische Kontinuumsselemente mit linearen Ansatzfunktionen verwendet. Das Element wird definiert durch vier Knoten und hat in jedem Knoten zwei translatorische Freiheitsgrade [3]. Die Berandung des Modells erfolgt durch die Kopplung mit Feder-Dämpfer-Elementen (vgl. Kap 5.4.1.3).

Analyse des mechanischen Modells

Bei der FEM ergibt sich im Übergang von der Integralformulierung die Bewegungsgleichung der Gesamtstruktur als Matrixformulierung wie folgt [7]:

$$M \ddot{u} + C \dot{u} + K u = f \quad (3.33)$$

mit der Massenmatrix M , der Dämpfungsmatrix C , der Steifigkeitsmatrix K , dem Verschiebungsvektor u , dem Geschwindigkeitsvektor \dot{u} , dem Beschleunigungsvektor \ddot{u} und dem Lastvektor f . Die Massenmatrix und Steifigkeitsmatrix ergeben sich entsprechend des gewählten Elementtyps für das zugrunde gelegte mechanische Modell [7], [3]. Bei den durchgeführten Berechnungen wird für die Massenmatrix eine konsistente Formulierung verwendet. Für die Dämpfungsmatrix wird vereinfacht ein von der Steifigkeit abhängiger Ansatz gewählt:

$$C = b K \quad (3.34)$$

mit dem materialabhängigen Dämpfungsmaß β . Auf die bei der vorliegenden Wellenausbreitungproblematik verwendeten Ansätze für die Dämpfungseinflüsse wird detailliert in Kap. 6 eingegangen.

Mit Hilfe der Bewegungsgleichung (3.33) kann das dynamische Verhalten mit linear elastischem Materialverhalten beschrieben werden. Die Einordnung der Dynamik ist bereits erfolgt und kann nach [35] als transienter Vorgang, d.h. ein abklingender Bewegungsvorgang von kurzer Zeitdauer, klassifiziert werden. Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens sind verschiedene Analysen des mechanischen Modells möglich [54]. Da für das vorliegende Problem der Wellenausbreitung der Zeitverlauf von Interesse ist, erfolgen die durchgeführten Berechnungen im Zeitbereich, d.h. mit Hilfe einer transienten Analyse [3].

3.3.1 Lösung der Bewegungsgleichung im Zeitbereich

Zur Lösung der Bewegungsgleichung im Zeitbereich wird ein Verfahren zur finiten Zeitübersetzung verwendet. Hierbei wird eine Diskretisierung der Zeitachse vorausgesetzt, um die Veränderung der Zustandsgrößen über die Zeit durch diskrete Größen in Zeitknoten beschreiben zu können [54]. Nach [7] können zur finiten Zeitübersetzung grundsätzlich Ein- und Mehrschrittverfahren, Integrations- und Kollokationsverfahren, bedingt und unbedingt stabile sowie explizite und implizite Verfahren unterschieden werden.

Für die durchgeführten Berechnungen wird ein implizites, unbedingt stabiles Zeitintegrationsverfahren nach Newmark verwendet [104]. Die Eignung dieses Verfahrens zur Berechnung von Wellenausbreitungsphänomenen wurde schon vielfach gezeigt [45].

Bei dem Verfahren nach Newmark werden folgende lineare Ansätze für die Geschwindigkeits- und Verschiebungsverläufe in Abhängigkeit der Beschleunigung getroffen [7]:

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + [(1-d)\ddot{u}_n + d\ddot{u}_{n+1}] \Delta t \quad (3.35)$$

$$u_{n+1} = u_n + \dot{u}_n \Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - a\right)\ddot{u}_n + a\ddot{u}_{n+1}\right] \Delta t^2 \quad (3.36)$$

mit den Integrationsparametern a und d , den Verschiebungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvektoren $u_n, \dot{u}_n, \ddot{u}_n$ zum Zeitpunkt t_n bzw. zum Zeitpunkt t_{n+1} sowie dem Zeitschritt $\Delta t = t_{n+1} - t_n$. Wenn die Anfangsbedingungen zum Zeitpunkt t_n bekannt sind, dann treten zum Zeitpunkt t_{n+1} die unbekannten Größen $u_{n+1}, \dot{u}_{n+1}, \ddot{u}_{n+1}$ auf. Zur Bestimmung wird die Bewegungsgleichung (3.33) mit den Gleichungen (3.35) und (3.36) so umgeformt, daß nur noch die Verschiebung u_{n+1} als Unbekannte enthalten ist [7].

Wählt man die Integrationsparameter $a = 0,25$ und $d = 0,5$, so entspricht diese Wahl der Annahme einer konstanten Beschleunigung im Zeitintervall Δt und es tritt keine numerische Dämpfung auf. Für $a \geq 0,25(0,5+d)^2$ und $d \geq 0,5$ ist das Verfahren unbedingt stabil. Werden die beiden Integrationsparameter größer als $a = 0,25$ und $d = 0,5$ gewählt, tritt numerische Dämpfung auf. Um das Maß der numerischen Dämpfung vorzugeben, wird im Programmsystem ANSYS der Parameter g eingeführt [3]. Die Integrationsparameter werden wie folgt festgelegt:

$$a = 0,25(1+g)^2 \text{ und } d = 0,5+g \quad (3.37)$$

Der Parameter g bestimmt das Maß der numerischen Dämpfung bzw. der numerischen Dissipation, die in das System eingebracht wird. Dies führt zu einer Abnahme der Schwingungsamplitude. Andererseits kann hiermit hochfrequentes Überschwingen unterdrückt werden [54], das für die vorliegende Problematik von Sprungstellen bei der Wellenausbreitung infolge Stoßbelastung wesentlich ist. Für die durchgeführten

Berechnungen wird daher das Maß für die numerische Dämpfung mit $g = 0,005$ festgelegt. Für die Genauigkeit des Zeitschrittintegrationsverfahrens ist neben den Integrationsparametern die Wahl von Elementgröße und Zeitschritt von entscheidender Bedeutung. Die Wahl erfolgt nach den in der Last, d.h. in dem Stoßimpuls, enthaltenen Frequenzen [7].

Simulation des Stoßimpulses

Der Stoßimpuls bzw. die transiente Anregung wird durch eine Kraft-Zeit-Funktion als Sinushalbwellen mit der Dauer t_c angenähert. Wie in Kap. 3.1 erläutert, wird nach Gleichung (3.26) der Frequenzgehalt f_{Grenz} und nach Gleichung (3.27) die Grenzwellenlänge λ_{Grenz} , die der Stoßimpuls enthält, festgelegt.

Wahl der Elementgröße

Zur Wahl einer geeigneten Elementgröße L_e existieren zahlreiche Untersuchungen [19], [45], [6]. Die Wahl erfolgt in Abhängigkeit der Grenzwellenlänge:

$$L_e = \frac{I_{\text{Grenz}}}{n} \quad (3.38)$$

Der Parameter n gibt die Anzahl der Elemente pro kleinster berücksichtigter Wellenlänge λ_{Grenz} an. Zur Wahl einer geeigneten Größe des Parameters n müssen die daraus entstehenden Effekte der numerischen Dissipation, d.h. der Abnahme der Amplitude mit fortschreitender Welle infolge numerischer Bedingungen, und die numerische Dispersion, d.h. die Periodenverlängerungen der Welle infolge numerischer Effekte, berücksichtigt werden. Nach [19] sind mindestens 10 Elemente pro Wellenlänge erforderlich. Um Ergebnisse mit einer ausreichenden Genauigkeit zu erzielen, wurde für die in dieser Arbeit durchgeführten Berechnungen eine Elementanzahl von $n \geq 20$ erforderlich:

$$L_e \leq \frac{I_{\text{Grenz}}}{20} \quad (3.39)$$

Wahl des Zeitschritts

Für das unbedingt stabile Integrationsverfahren nach Newmark ist ein Zeitschritt Δt so zu wählen, daß der numerische Fehler möglichst gering ist. Für die Wahl sind daher ebenfalls die Effekte der numerischen Dissipation und Dispersion zu berücksichtigen [20]. Für die durchgeführten Berechnungen wird der Zeitschritt festgelegt mit:

$$\Delta t = \frac{L_e}{c_D} \quad (3.40)$$

3.3.2 Modalanalyse

Die Standardauswertung der Integritätsprüfung erfolgt im Zeitbereich. Die Auswertung im Frequenzbereich wird in Kap. 7.4 beschrieben. Zur Beurteilung im Frequenzbereich werden die Eigenfrequenzen des Pfahl-Boden-Systems betrachtet. Um die Eigenfrequenzen des mechanischen Modells numerisch zu bestimmen, wird die Modalanalyse angewendet.

Für den ungedämpften Fall ergibt sich aus der homogenen Bewegungsgleichung (3.33) [7]:

$$M \ddot{u} + K \ddot{u} = 0 \quad (3.41)$$

Mit dem Ansatz

$$u = \bar{u} \cos \omega t \quad (3.42)$$

folgt aus Gleichung (3.41):

$$(-\omega^2 M + K) \bar{u} = 0 \quad (3.43)$$

Aus der Bedingung der verschwindenden Determinante ermittelt man die Eigenfrequenzen mit [65], [71]:

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (3.44)$$

Die weitere Berechnungsdurchführung zur Bestimmung der Eigenfrequenzen ist in Kap. 7.3 erläutert.

4 Untersuchungen zum Meßverfahren der Integritätsprüfung

Um eine möglichst aussagekräftige Messung durchzuführen, ist es von entscheidender Bedeutung, daß meßtechnische Störeinflüsse minimiert werden und ein optimal auf die Meßaufgabe angepaßtes Meßsystem verwendet wird. Zunächst erfolgen Untersuchungen zum Meßverfahren, damit derartige Anforderungen festgelegt werden können. Diese teilen sich auf in die Untersuchungen zur Impulseinleitung und zum Meßaufnehmer. Meßtechnische Anforderungen können nicht mit Hilfe eines begrenzten Standardmeßsystems festgelegt werden, sondern es ist erforderlich, ein spezielles Meßsystem zu entwickeln.

4.1 Entwicklung eines Meßsystems

Die Komponenten eines Meßsystems für die Integritätsprüfung werden bereits in Kap. 3.2 vorgestellt. Dabei handelt es sich im wesentlichen um Meßaufnehmer, Meßverstärker, A/D-Wandler, Steuerung inkl. Speichermedium und Impulseinleitung. Der Meßaufnehmer und die Impulseinleitung werden bei den durchgeführten Messungen variiert und in den Kap. 4.3 und 4.4 beschrieben.

Die Anforderungen an das Meßsystem werden durch die abzubildende Stoßwellenausbreitung bestimmt. Die hochfrequenten Anteile des Stoßimpulses sollen mit dem nutzbaren Frequenzbereich des Meßsystems erfaßt werden. Zur Abbildung der sprungartigen Änderungen bei einer Stoßanregung muß die meßbare Anstiegszeit des Systems möglichst gering sein. Diese Anforderungen müssen durch alle Komponenten der Meßkette erfüllt werden.

Meßverstärker

Die Forderung nach einer geringen Anstiegszeit ist für die Eignung des Meßverstärkers entscheidend. Die Anstiegszeit ist um so kleiner, je höher die Grenzfrequenz des Verstärkers ist. Für die Messung wird ein speziell für die ICP-Meßaufnehmer abgestimmter Verstärker verwendet, der gleichzeitig als Aufnehmerspeisung dient. Das 16-Kanal-System ermöglicht eine zeitgleiche Mehrkanalmessung. Die Grenzfrequenz des Gerätes beträgt bei minimaler Fehlerabweichung $f_{\text{Grenz, VST}} = 100 \text{ kHz}$. Die Genauigkeitsanforderung an den Verstärker folgt aus den maximalen Frequenzanteilen der auftretenden Stoßimpulse, die in einem Bereich bis ca. $f_{\text{Grenz}} = 10 \text{ kHz}$ abgegrenzt werden können. Eine genaue Abgrenzung der auftretenden Frequenzanteile resultiert aus den Untersuchungen zur Impulseinleitung in Kap. 4.3. Die Anforderung an die Grenzfrequenz des Verstärkers $f_{\text{Grenz, Vst}}$ kann ähnlich wie bei der Zeitdiskretisierung zur numerischen Simulation in Kap. 3.3 in Abhängigkeit der Grenzfrequenz des Stoßimpulses f_{Grenz} definiert werden. Mit einer Auflösung der Impulsdauer in ebenfalls $n = 10$ Zeitschritten folgt mit den Gleichungen (3.26), (3.27), (3.38) und (3.40):

$$f_{\text{Grenz, VST}} \geq 10 f_{\text{Grenz}} \quad (4.1)$$

Nach Gleichung (4.1) ist somit eine ausreichende Grenzfrequenz des Verstärkers gegeben.

A/D Wandler

Die Hauptanforderung an den A/D Wandler bzw. an die Digitalisierung besteht in der erforderlichen Abtastfrequenz $f_{A/D}$, die vergleichbar mit der Grenzfrequenz des Meßverstärkers nach Gleichung (4.1) definiert werden kann:

$$f_{A/D} \geq 10 f_{Grenz} \quad (4.2)$$

Daraus resultiert eine erforderliche Abtastfrequenz von mindestens 100 kHz je Meßkanal. Neben der erforderlichen Abtastfrequenz besteht mit der Auflösung der digitalisierten Meßwerte eine weitere Genauigkeitsanforderung. Wie die Untersuchungen zeigen, ist dieses unproblematisch, da bereits eine 12-bit-Auflösung bei entsprechender Verstärkung ausreichend ist.

Für die durchgeführten Messungen wird ein externes A/D-Wandlersystem mit integriertem Prozessor (DSP) und lokalem Speicher verwendet. Das System enthält insgesamt vier A/D-Wandlungsmodule, davon zwei Module mit einer 16-bit-Auflösung bei Abtastraten von bis zu 100 kHz und zwei Module mit einer 12-bit-Auflösung bei Abtastraten von bis zu 1 MHz. Das System stellt insgesamt 16 analoge Eingänge zur Verfügung, die über entsprechende Multiplexer den Wandlungsmodulen zugeordnet sind. Die Steuerung der Meßwertaufnahme erfolgt über die Programmierung des Prozessors. Hierzu steht ein spezieller A/D-Basic-Compiler zur Verfügung, mit dem optimierte, schnelle Algorithmen programmiert werden können [43].

Die erforderliche hohe Abtastrate von mindestens 100 kHz je Meßkanal wurde durch eine zeitlich angepaßte Programmierung des Meßablaufes realisiert. Hierbei ist die geforderte Anzahl von gleichzeitig gemessenen Kanälen die größte Einschränkung für die umsetzbare Abtastfrequenz, da die Einschwingzeiten des Multiplexers in den zeitkritischen Programmablauf eingerechnet werden müssen. Die Anzahl von gleichzeitig gemessenen Kanälen wurde daher auf vier begrenzt. Hierfür wird eine Abtastfrequenz von bis zu 200 kHz ermöglicht. Der programmierte Meßablauf teilt sich auf in den Pre- und den Posttrigger. Im Pretrigger wird ein Ringspeicher (FIFO) mit einer auf 1024 Werte begrenzten Größe realisiert, der solange mit Werten belegt wird, bis ein Ereignis vorgegebener Größe (Trigger) überschritten ist. Anschließend wird der mit variabler Größe definierbare Posttrigger belegt. Die Meßwertaufnahme wird beendet, wenn dieser vollständig belegt ist. Nach der Beendigung des Meßprozesses findet ein Datenaustausch mit der Steuerung und dem Speichermedium statt.

Steuerung und Speichermedium

Die Steuerung und Speicherung werden mit einem PC realisiert, der über eine Datenschnittstelle mit dem A/D Wandlersystem verbunden ist. Die Meßsteuerung und -analyse wird mit dem Programm TESTPOINT [96] umgesetzt. Dieses ist eine objektorientierte

Entwicklungsumgebung zur Programmierung von Meßapplikationen inkl. der Meßanalyse. Über die Definition globaler Datenfelder erfolgt der Austausch mit dem A/D Basic Prozeß des Wandlers [43]. Zur Meßanalyse werden für die entwickelte TESTPOINT-Applikation Funktionen wie z.B. Frequenztransformationen, Korrelationsfunktionen, verschiedene Filterfunktionen, Integrationsfunktionen, Ein- und Ausgabeschnittstellen sowie die Überlagerungsmöglichkeit mit Simulationssignalen programmiert (Abb. 4.1). Somit ist eine flexible Anpassung oder Erweiterung der Applikation an die Meßaufgabe möglich.

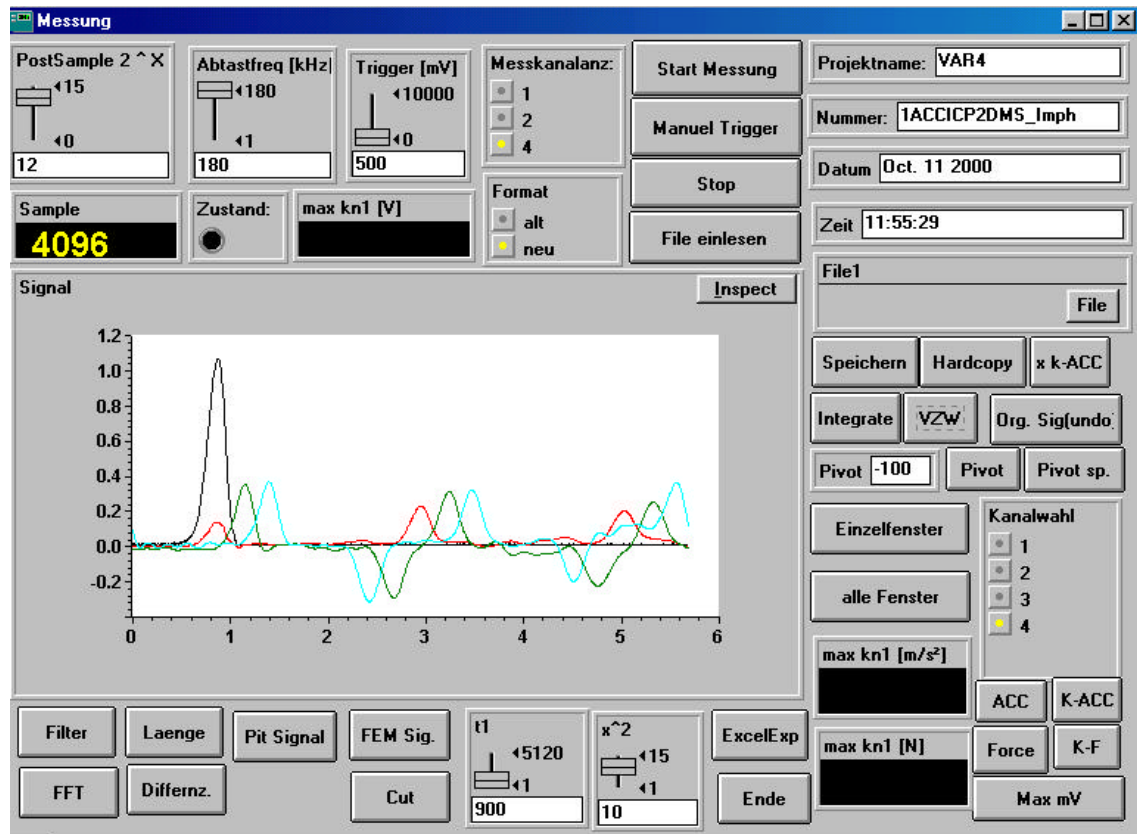


Abb. 4.1: Programmoberfläche der entwickelten TESTPOINT-Applikation

Das Meßsystem, das sich aus den beschriebenen Komponenten ergibt, ist in Abb. 4.2 schematisch dargestellt. Es wird für die Untersuchung der Impulseinleitung und der Anforderungen an den Meßaufnehmer verwendet.

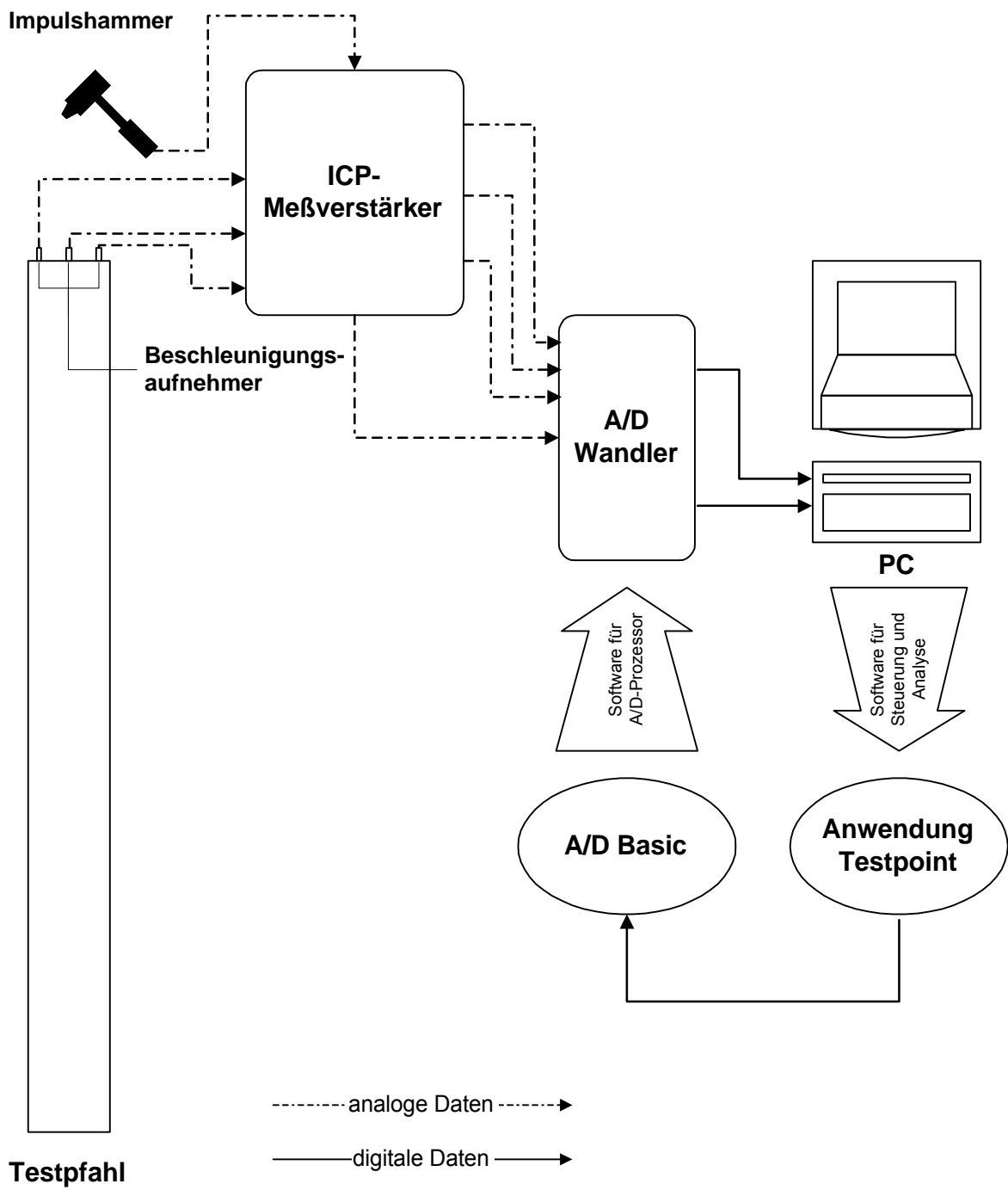


Abb. 4.2: Entwickeltes Meßsystem

4.2 Untersuchung der Impulseinleitung

Der Stoßimpuls wird, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, durch seine Dauer, die Kraftamplitude und den Kraftverlauf charakterisiert. Er ist für die Integritätsprüfung von entscheidender Bedeutung, da er die interpretierbare Impedanzänderung definiert. Daher ist es wichtig, einen optimal an die Meßaufgabe angepaßten Stoßimpuls zu erzeugen. Um dies gezielt realisieren zu können, werden in diesem Kapitel die Zusammenhänge der Impulseinleitung untersucht.

Hierzu werden Messungen an einem zylindrischen Modellpfahl mit einer Länge von 1,5 m und einem Durchmesser von 0,15 m durchgeführt. Der Pfahl wird unbewehrt hergestellt und weist eine Betonfestigkeit der Festigkeitsklasse B25 auf. Für den Modellpfahl wird für den Zuschlag ein Größtkorn von 2 mm verwendet, und der in der Stoffraumrechnung angesetzte Wasser-Zement-Wert beträgt 0,67 [84].

Die Messungen teilen sich auf in die Untersuchung hochfrequenter Impulseinleitungen und die Untersuchung verschiedener Impulshämmer.

Untersuchung hochfrequenter Impulseinleitungen

Die Untersuchung hochfrequenter Impulseinleitungen, d.h. Impulse mit sehr kurzer Stoßdauer, erfolgt mit der Anregung durch den Anprall spezieller Kugeln. Das Erzielen einer sehr kurzen störungsfreien Stoßdauer ist von Interesse, da diese eine maximale Auflösung von Impedanzänderungen ermöglicht. Zur qualitativen Beurteilung kann die im Kap. 3.1 erläuterte Theorie nach Hertz für den geraden zentrischen Stoß kugelförmiger Körper herangezogen werden. Hierbei wird für die Betonoberfläche des Pfahls ein im Vergleich zum Radius der Stoßkugel sehr großer Radius angesetzt. Für die Impulsanregung werden Kugeln definierter unterschiedlicher Durchmesser und Materialeigenschaften verwendet. Die Fallhöhe der Kugel kann durch eine spezielle Vorrichtung variiert werden. Somit können alle erforderlichen Parameter zur Berechnung von Stoßdauer und Stoßkraft mit den Gleichungen (3.28) bis (3.32) bestimmt werden.

Für die Messungen wurden Kugeln mit einem Durchmesser von 10, 20 und 30 mm aus gehärtetem Standardstahl, Blei und den Kunststoffen Polypropylen (PP), Polyamid (PA) sowie Polyoxymethylen (POM) verwendet. Die Fallhöhe wurde in einem Bereich von 20 bis 80 cm variiert.

Der Stoßimpuls bzw. die Wellenausbreitung wird mit dem in Kap. 4.1 beschriebenen Meßsystem erfaßt. Aus dem zur Geschwindigkeit integrierten Meßsignal des Beschleunigungsaufnehmers wird die Stoßdauer näherungsweise ermittelt.

Beispielhaft sind die Meßergebnisse für die Variation des Durchmessers der Stahlkugel in Abb. 4.3 dargestellt. Aus der gemessenen Stoßdauer kann mit Gleichung (3.26) die Grenzfrequenz ermittelt werden.

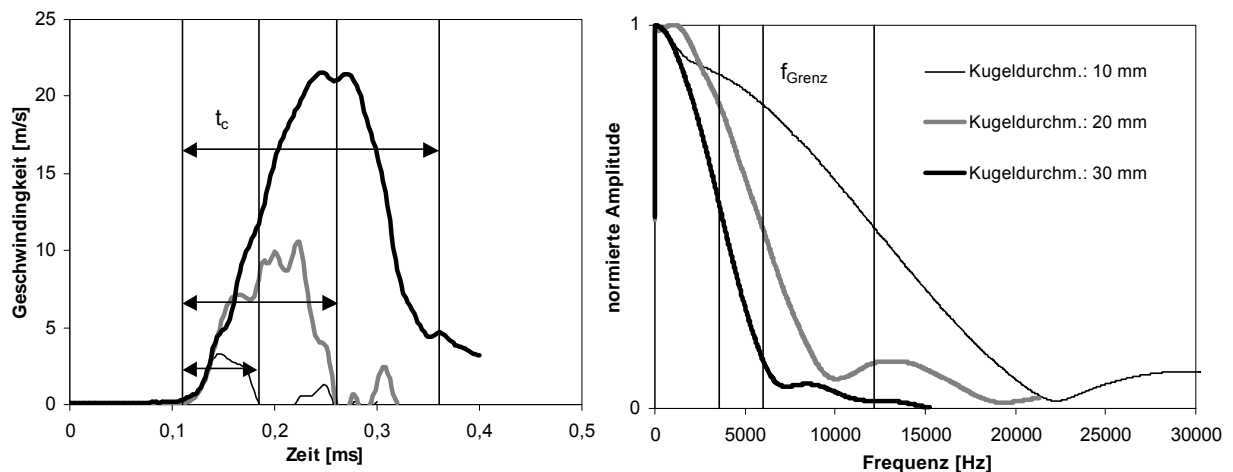


Abb. 4.3: Variation des Stahlkugeldurchmessers

Eine Übersicht der gemessenen Stoßdauer bzw. Grenzfrequenz bei den Variationen von Fallhöhe, Kugeldurchmesser und –material ist in Tab. 4.1 gegeben. Hierbei werden den gemessenen Werten die nach Hertz berechneten Größen gegenübergestellt. Im Rahmen der Meßgenauigkeit zeigt sich, daß die gemessenen Werte qualitativ gut angenähert werden können. Bei den Kunststoffen treten aufgrund der kleineren Kugelmassen geringere Kraftintensitäten und somit größere Meßschwankungen auf.

Tab. 4.1: Berechnete und gemessene Stoßimpulsdauer

Material	Fallhöhe	Kugel- durchmesser	Stoßdauer gemessen	Stoßdauer nach Hertz	Grenzfrequenz gemessen	Grenzfrequenz nach Hertz
	[cm]	[mm]	[ms]	[ms]	[Hz]	[Hz]
Stahl	20	10	0,07	0,05	15000	18728
Stahl	20	20	0,15	0,11	6667	9364
Stahl	20	30	0,21	0,15	4800	6242
Stahl	80	30	0,19	0,14	5333	7171
PP	20	20	0,12	0,15	8667	6469
PP	20	30	0,17	0,22	5867	4597
PP	50	30	0,17	0,21	6000	4726
PP	80	30	0,12	0,19	8667	5281
POM	20	30	0,15	0,19	6533	5363
PA	20	30	0,17	0,19	5800	5392
Blei	20	19	0,27	0,14	3667	7265

Die auftretenden Abweichungen der Stoßzeiten werden durch die indirekte Bestimmung der Stoßdauer mit Hilfe des Beschleunigungsaufnehmers beeinflusst. Dieses kann anhand der Messungen mit instrumentierten Impulshämmern belegt werden.

Entscheidend für die Stoßdauer ist nach Gleichung (3.32) der Kugeldurchmesser. Bei den Messungen ergibt sich entsprechend für den kleinsten Kugeldurchmesser die kürzeste Stoßdauer. Die kürzeste realisierbare Stoßdauer ist durch die Kraftintensität, durch die Überlagerungen mit horizontalen Querschwingungen (Abb. 3.3) und durch die Anforderung an die minimale Stoßwellenlänge für die Entstehung einer Dehnwelle (vgl. Kap. 3.1) begrenzt. Die minimale Stoßwellenlänge ist bei nahezu allen durchgeführten Variation größer als der Pfahldurchmesser d , so daß die Ausbreitung einer Dehnwelle mit der Wellengeschwindigkeit c_D angenommen werden kann. Nach [19] treten bei einer Stoßdauer t_c mit:

$$t_c \leq \frac{2}{c_D} d \quad (4.3)$$

Überlagerungen mit Querschwingungen auf. Diese Annahme kann mit Hilfe der durchgeführten Messungen auf die Integritätsanwendung übertragen und bestätigt werden. Wenn die Stoßdauer kleiner als der Grenzwert von Gleichung (4.3) ist, werden starke Querschwingungen im Geschwindigkeitsverlauf erfaßt. In Abb. 4.4 sind beispielhaft diese Querschwingungen in einer auf den Einleitungsimpuls normierten Darstellung abgebildet.

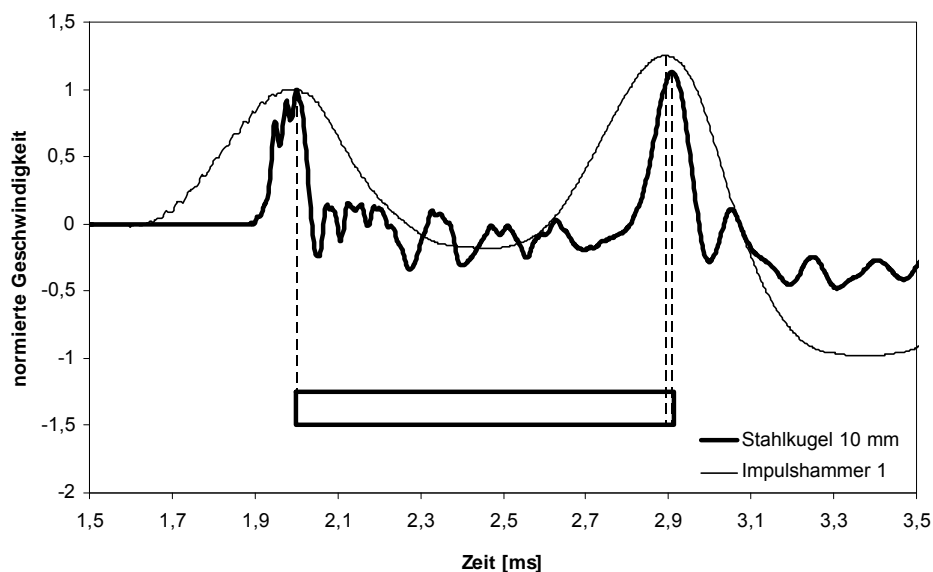


Abb. 4.4: Vergleich unterschiedlicher Impulseinleitungsarten zur Begrenzung der minimalen Stoßdauer

Die Variation der Fallhöhe zeigt entsprechend der Gleichung (3.31) einen geringen Einfluß auf die Ergebnisse. Der Einfluß der unterschiedlichen Materialeigenschaften stimmt im relativen Verhältnis untereinander überein. Für die härteren Materialien kann die Stoßdauer rechnerisch angenähert werden. Der Stoßvorgang für die elastischeren Kunststoffe, die

gegenüber Stahl und Beton eine geringe Dichte haben, kann nur näherungsweise mit der Gleichung (3.30) beschrieben werden. Dennoch kann über die Geometrie- und Materialeigenschaften der Frequenzgehalt gesteuert werden. Dieses kann bei der Verwendung von Impulshämmern genutzt werden. Im Vergleich zur Stoßeinleitung mit einer frei fallenden Kugel, treten bei einem Hammerschlag größere Beschleunigungen und somit größere Kraftintensitäten auch bei Kunststoffen auf.

Untersuchung verschiedener Impulshämmer

Um den Stoßimpuls neben den hochfrequenten Anregungen gezielt auch mit geringerem Frequenzgehalt vorgeben zu können, werden Messungen mit verschiedenen Impulshämmern durchgeführt. Es werden Impulshämmer unterschiedlicher Masse sowie unterschiedlicher Größe und Härte der Schlagkappe verwendet. Für die mit einem Meßaufnehmer instrumentierten Impulshämmer kann die Kraftintensität und die Stoßdauer direkt bestimmt werden. Ein Beispiel für den Kraftverlauf und dem daraus resultierenden Frequenzspektrum ist für den instrumentierten Impulshammer 1 mit einer Masse von 0,5 kg und einem Schlagkappendurchmesser von 10 mm in Abb. 4.5 dargestellt. Hierbei ist der Kraftverlauf für eine Schlagkappe aus Hartmetall (A) und aus Kunststoff (B) abgebildet. Die Variation des Schlagkappenmaterials führt bei nahezu gleicher Hammermasse etwa zu einer Verdoppelung der Stoßdauer.

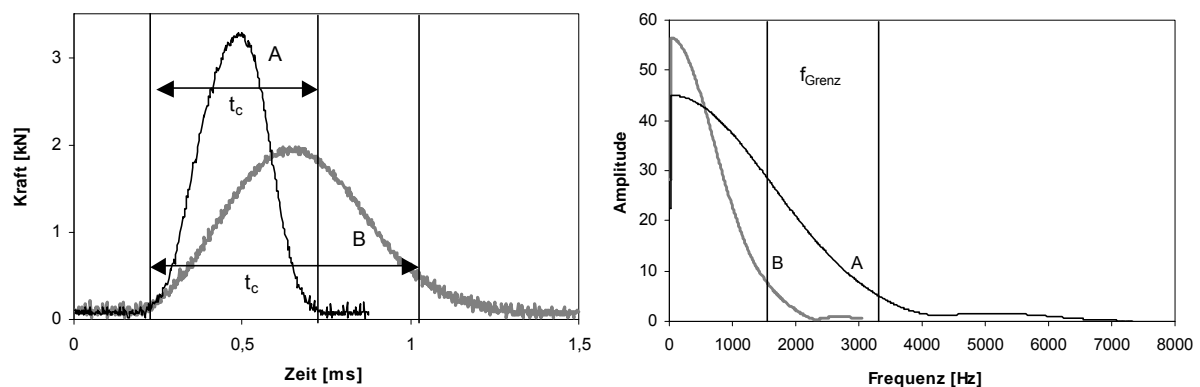


Abb. 4.5: Kraftverlauf für den instrumentierten Impulshammer mit unterschiedlichen Schlagkappen

Bei zeitgleicher Messung der Kraft mit dem Impulshammer und der zur Geschwindigkeit integrierten Beschleunigung am Pfahlkopf kann eine Zeitdifferenz bei dem ermittelten Stoßbeginn festgestellt werden (vgl. Abb. 4.6). Wie bereits bei der Untersuchung hochfrequenter Impulseinleitungen beschrieben, können also bei der indirekten Bestimmung der Stoßdauer mit dem Beschleunigungsaufnehmer geringe Abweichungen auftreten.

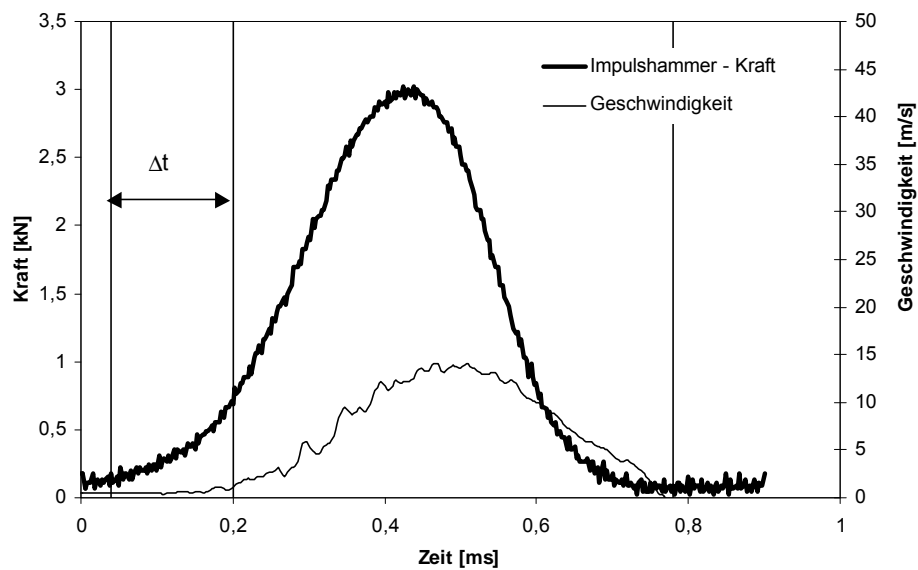


Abb. 4.6: Vergleich von gemessenem Kraft- und Geschwindigkeitsverlauf

Ein Vergleich der indirekt aus dem Beschleunigungssignal bestimmten Frequenzgehalte bei der Anregung mit unterschiedlichen Impulsgebern ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Frequenzgehalte sind in mehreren Meßreihen reproduzierbar und können somit gezielt vorgegeben werden, um eine Anpassung an die Meßaufgabe zu gewährleisten. Die ermittelte Stoßdauer für die in Abb. 4.6 und 4.7 dargestellten Variationen ist in Tab. 4.2 gegeben.

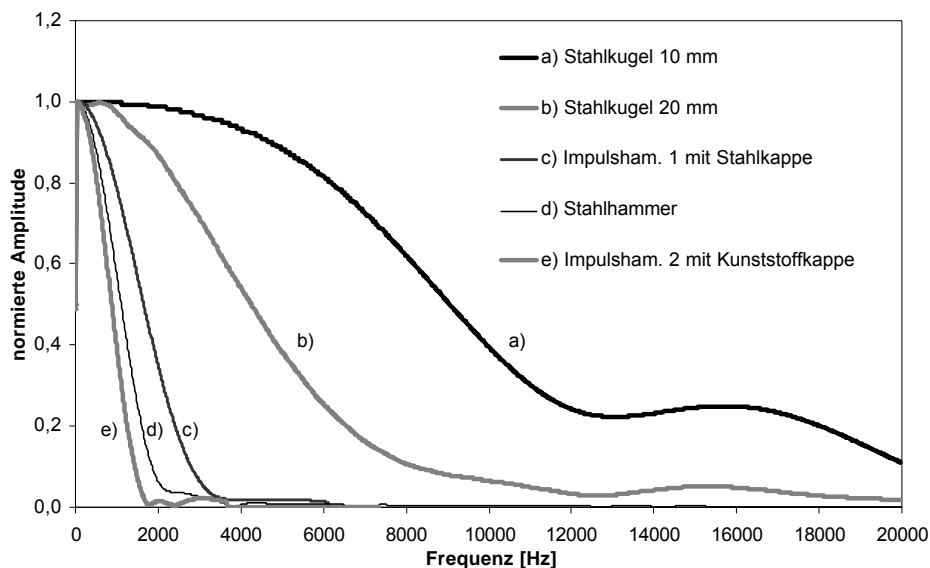


Abb. 4.7: Vergleich des Frequenzhaltes bei Anregung mit unterschiedlichen Impulsgebern

Tab. 4.2: Vergleich der Stoßdauer bei Anregung mit unterschiedlichen Impulsgebern

Impulsgeber	Stoßdauer [ms]	Grenzfrequenz [Hz]
Stahlkugel 10 mm	0,07	15000
Stahlkugel 20 mm	0,15	6667
Impulshammer 1 mit Stahlkappe	0,50	2000
Impulshammer 1 mit Kunststoffkappe	0,84	1190
Stahlhammer	0,91	1099
Impulshammer 2 mit Kunststoffkappe	1,01	990

Eine längere Stoßdauer kann bei der Verwendung von Impulshämmern mit größerer Masse und größerer Fläche der Schlagkappe erzeugt werden. Für die begrenzte Länge des Modellpfahls treten ab einer bestimmten Stoßdauer Überlagerungen des Einleitungsimpulses mit den vom Pfahlfuß reflektierten Wellenanteilen auf (vgl. Abb. 4.8). Dieses wird bei dem Modellpfehl ab einer Dauer von ca. $t_c = 0,85$ ms beobachtet. Es kann somit eine maximale Stoßdauer t_c in Abhängigkeit der Pfahllänge L und der Dehnwellengeschwindigkeit c_D definiert werden:

$$t_c \leq \frac{2L}{c_D} \quad (4.4)$$

Wenn die Stoßdauer größer als der Grenzwert ist, überlagern sich im Pfehl abwärts und aufwärts laufende Wellenanteile. Die Wellenausbreitungproblematik geht dann über in einen Schwingungsvorgang (Abb. 3.1).

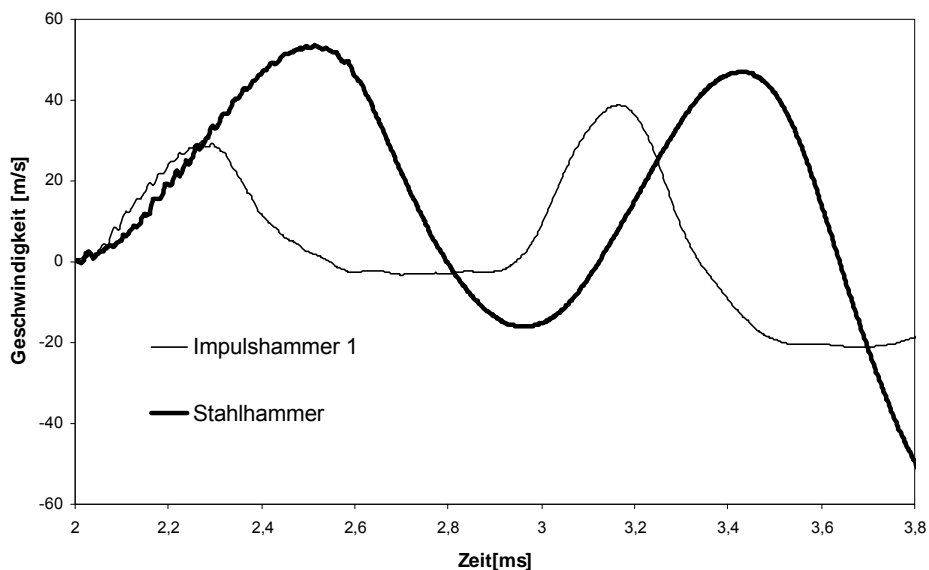


Abb. 4.7: Vergleich unterschiedlicher Impulseinleitungsarten zur Begrenzung der maximalen Stoßdauer

4.3 Anforderungen an den Meßaufnehmer

Für die Integritätsprüfung muß gewährleistet sein, daß der Meßaufnehmer den Frequenzgehalt des Stoßimpulses erfassen kann. Wie in Kap. 3.2 beschrieben, wird die Eignung eines Aufnehmers einerseits durch seine Eigenfrequenz und andererseits durch seine Kopplung mit dem Meßobjekt bestimmt. Daher teilen sich die durchgeführten Messungen auf in die Untersuchung des Meßaufnehmertyps und der Meßaufnehmerankopplung. Die Messungen werden ebenfalls an dem in Kap. 4.2 vorgestellten Modellpfahl durchgeführt.

Untersuchung des Meßaufnehmertyps

Der nutzbare Frequenzbereich eines Aufnehmers wird durch die Resonanzüberhöhung bei seiner Eigenfrequenz f_0 begrenzt mit der oberen Grenzfrequenz $f_{g0} \leq 0,3 f_0$. Diese Begrenzung wird aber durch die Ankopplung des Aufnehmers an das Meßobjekt beeinflusst. Zur Minimierung dieses Einflusses wird daher für die Meßreihen eine möglichst starre Ankopplung verwendet. Um den von einem Aufnehmer erfaßbaren Frequenzbereich zu beurteilen, erfolgt die Stoßimpulsanregung mit unterschiedlich großem Frequenzgehalt. Für die Untersuchung werden fünf verschiedene Aufnehmertypen mit Eigenfrequenzen von 40 bis 75 kHz verwendet (Tab. 4.3).

Tab. 4.3: Verwendete Meßaufnehmertypen

Aufnehmertyp	Masse [g]	f_0 [kHz]	$f_{g0} = 0,3 f_0$ [kHz]
A	1,5	75	22
B	17	48	14
C	11	48	14
D	40	44	13
E	56	40	12

Beispielhaft ist in Abb. 4.8 der Geschwindigkeitsverlauf für den Aufnehmertyp E mit der niedrigsten Eigenfrequenz bei einer Impulsanregung mit einer Grenzfrequenz nach Gleichung (3.26) von ca. 10 kHz dargestellt. Obwohl eine relativ starr verschraubte Ankopplung vorliegt, wird die Eigenschwingproblematik unterhalb der oberen Grenzfrequenz f_{g0} deutlich. Dieses ist ebenfalls im Vergleich der Frequenzspektren von Aufnehmertyp A und E in Abb. 4.9 bei einer Frequenz von ca. $0,15 f_0 = 6$ kHz erkennbar. Mit den Aufnehmertypen B bis D kann wie mit dem Typ A der Frequenzgehalt des Stoßimpulses abgebildet werden. Es zeigt sich, daß die Anforderung an den Meßaufnehmer neben seiner Eigenfrequenz wesentlich durch dessen Ankopplung bestimmt wird.

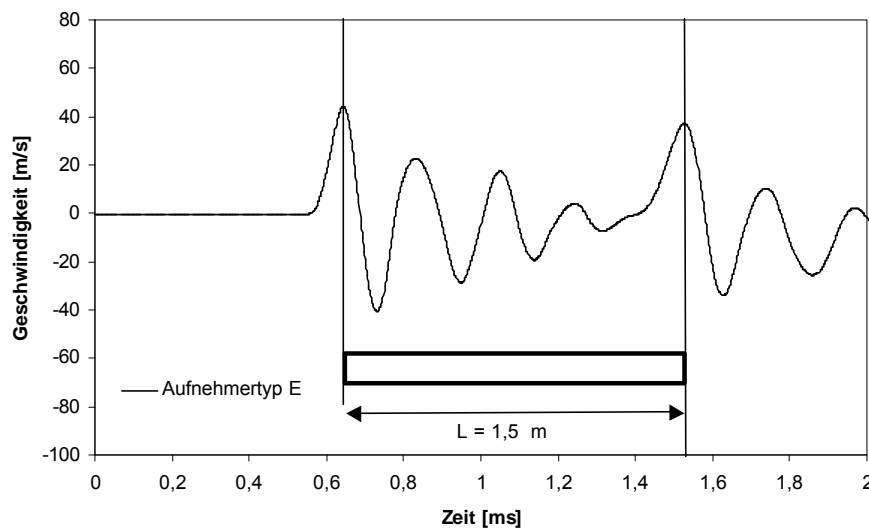


Abb. 4.8: Geschwindigkeitsverlauf für Meßaufnehmertyp E mit Frequenzgehalt des Stoßimpulses im Bereich der Grenzfrequenz des Aufnehmers

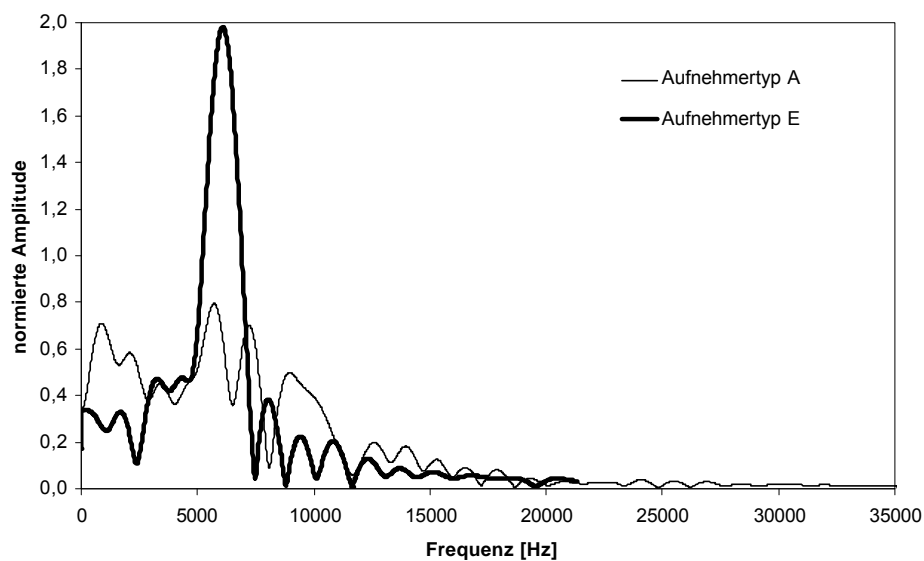


Abb. 4.9: Vergleich des Frequenzspektrums für Meßaufnehmertyp A und E mit Frequenzgehalt des Stoßimpuls im Bereich der Grenzfrequenz des Aufnehmers E

Untersuchung der Meßaufnehmerankopplung

Der nutzbare Frequenzbereich eines Aufnehmers wird durch die Art der Ankopplung mit der Pfahlkopfoberfläche verändert. Je starrer die Ankopplung mit der Betonoberfläche ist, um so größer ist der mit dem Aufnehmer erfassbare Frequenzbereich. Aufgrund der Materialeigenschaften des Betons ist eine starre Kopplung problematisch.

Die Untersuchungen erfolgen mit fünf verschiedenen Ankopplungsarten:

- a) angeschraubte Ankopplung über eine starr verklebte Metallplatte
- b) Ankopplung mit Spezialwachs über eine starr verklebte Metallplatte
- c) angeschraubte Ankopplung über eine starr verdübelte Metallplatte
- d) Aufnehmer angehalten
- e) Ankopplung mit spezieller Knetmasse.

Die Ankopplungsarten sind von a) bis e) abnehmend starr ausgebildet. Dieses spiegelt sich in den erfaßten Frequenzspektren bei einer Impulsanregung mit einer Grenzfrequenz von ca. 6,7 kHz wieder (Abb. 4.11). Die starren Kopplungen a), b) und c) erfassen den eingeleiteten Frequenzgehalt. Bei den Ankopplungen d) und e) wird der höhere Frequenzgehalt des Stoßimpulses nicht abgebildet. Dieses kann dazu führen, daß Fehlstellen kleiner Ausdehnungen nicht erfaßt werden. Die beiden Ankopplungsarten d) und e), die den tieferen Frequenzbereich wiedergeben, werden aber häufig bei der praxisorientierten Durchführung der Integritätsprüfung verwendet. Somit ergibt sich die Anforderung an die Ankopplung in Abhängigkeit des für die Meßaufgabe erforderlichen Frequenzgehaltes.

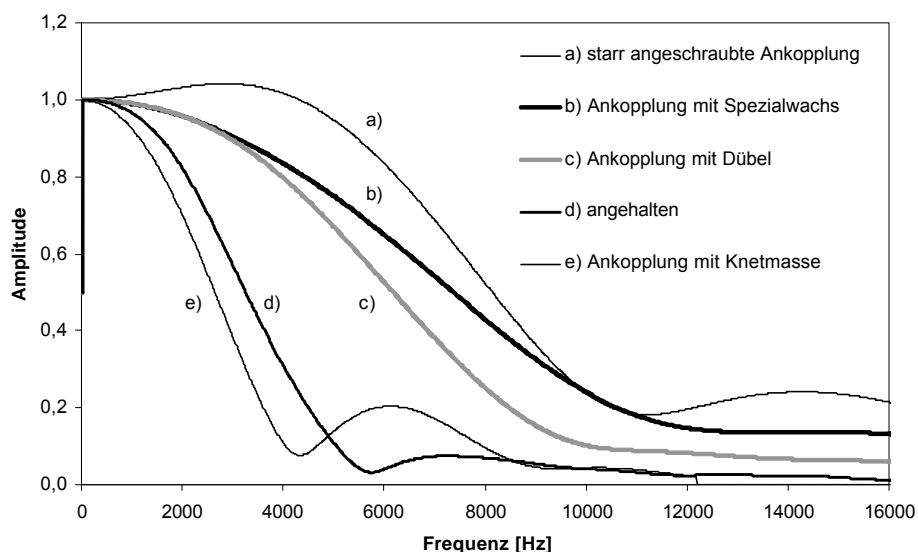


Abb. 4.11: Frequenzspektren für die Ankopplungsarten a) bis e)

In Abhängigkeit des erfaßten geringeren Frequenzgehaltes für die Ankopplungsarten d) und e) treten Laufzeitverschiebungen im Geschwindigkeitssignal auf (Abb. 4.12 und 4.13). Diese führen zu einer Abweichung bei der Interpretation der korrekten Pfahllänge. Die Abweichungen liegen im Bereich der in Kap. 2 aufgeführten Genauigkeitsgrenzen. Bei der Ankopplung mit Spezialknetmasse ist die Verwendung einer möglichst minimalen Menge der Masse von großer Bedeutung. Die viskose Masse wirkt in Abhängigkeit der Menge stark dämpfend wie eine Art Frequenzfilter. Dies kann neben den Laufzeitabweichungen verstärkt dazu führen, daß kleinere Fehlstellen nicht erkannt werden.

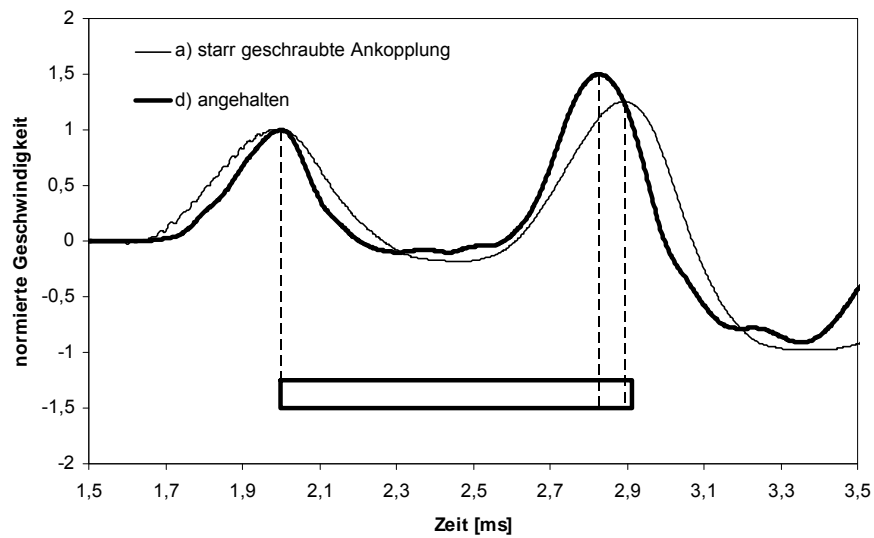


Abb. 4.12: Geschwindigkeitsverlauf für die Ankopplungsarten a) und d)

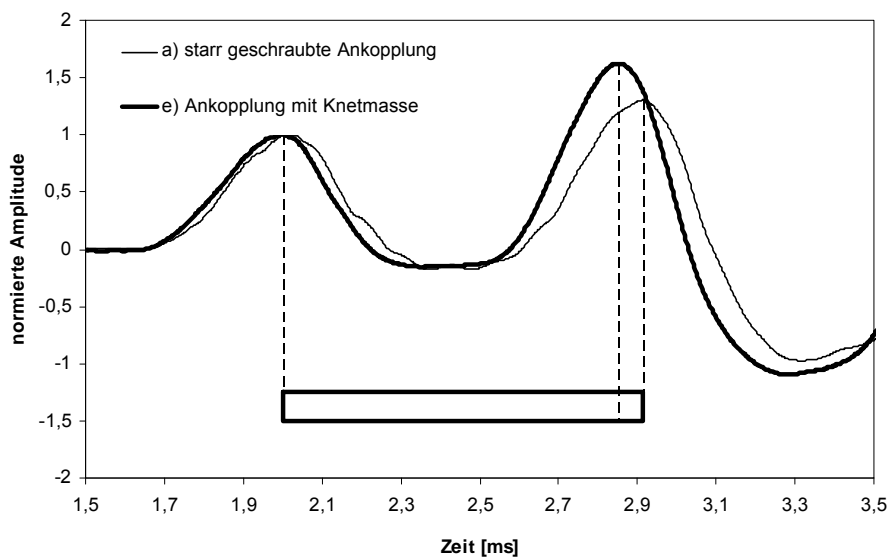


Abb. 4.13: Geschwindigkeitsverlauf für die Ankopplungsarten a) und e)

Für die weiteren Untersuchungen in Kap. 5 werden die Aufnehmertypen A und B mit der Ankopplungsart a) verwendet. Resultierend aus den Untersuchungen zu den Anforderungen an den Meßaufnehmer wird gezeigt, daß so der Frequenzgehalt auch bei hochfrequenten Impulsanregungen erfaßt wird.

4.4 Erweiterungen der Meßkette

Die Standardmessung wird mit einem Beschleunigungsaufnehmer am Pfahlkopf durchgeführt. Die Aussagemöglichkeiten, die anhand des Meßsignals getroffen werden, können durch eine sinnvolle Erweiterung der Meßkette verbessert werden. Im Rahmen der Untersuchungen wird die Erweiterung der Meßkette entlang der Pfahlachse in mehreren Meßebenen realisiert. Somit kann jede Ebene einzeln zur Interpretation der Pfahlgeometrie herangezogen werden. Weiterhin kann durch den bekannten Abstand der Meßebenen der Wellendurchgang bzw. die Wellengeschwindigkeit abschnittsweise sehr genau erfaßt werden.

Für die Messung der Pfahlfußreflexion durchläuft die Stoßwelle bei der Standardmessung eine Strecke, die der doppelten Pfahllänge entspricht. Bei großen Pfahllängen bzw. großem Dämpfungseinfluß wird die Interpretation des Fußreflexes problematisch. Hier bietet die Erweiterung der Meßkette Vorteile, da sich die Laufstrecke der Welle für die weiter vom Pfahlkopf entfernten Meßebenen verkleinert.

Wie in Kap. 2 beschrieben, existiert eine Anwendungsgrenze der Integritätsprüfung bezüglich großer Pfahldurchmesser. Die hierbei auftretenden Oberflächenwellen machen eine Interpretation der Beschleunigungsmessung am Pfahlkopf unmöglich. Ähnlich wie bei dem Austin - Verfahren kann für diesen Fall durch die Erweiterung der Meßkette entlang der Pfahlachse eine Interpretation der Meßsignale tieferer Ebenen erfolgen.

4.4.1 Mögliche Meßaufnehmer

Für die praxisrelevante Messung müssen die für eine Erweiterung der Meßkette verwendeten, nicht wiedergewinnbaren Meßaufnehmer einerseits möglichst kostengünstig sein. Andererseits muß sichergestellt sein, daß die Aufnehmer den dynamischen Vorgang der Stoßwellenausbreitung mit einer ausreichenden Genauigkeit abbilden können. Als zusätzliche Aufnehmer sind folgende Meßaufnehmertypen möglich:

- Beschleunigungsaufnehmer
- Geophon
- Lichtwellenleiter
- Aufnehmer auf DMS Basis.

Beschleunigungsaufnehmer, Geophon

Die Eignung von Beschleunigungsaufnehmern zur Messung der vorliegenden Stoßwellenproblematik wurde in Kap. 4.3 gezeigt. Dieses gilt ebenfalls für das Geophon, bei dem der erfaßbare Frequenzgehalt in der Regel geringer ist als der eines Beschleunigungsaufnehmers. Aufgrund der hohen Kosten für diese Aufnehmertypen können sie nicht in größerer Anzahl für die Einbettung in einen Pfahl verwendet werden.

Lichtwellenleiter

Hierbei handelt es sich um ein relativ neu entwickeltes Meßprinzip. Es existieren mehrere Arten faseroptischer Dehnungssensoren, wie z.B. die Faser-Bragg-Gitter-Sensoren und Fabry-Perot-Interferometer-Sensoren (FPI), deren Wirkungsprinzipien in [31] beschrieben sind. Mit derartigen Sensorketten können mit geringem Aufwand zusätzliche Meßebenen entlang des Pfahlschafts realisiert werden. Die geringen Durchmesser der Sensoren sind besonders gut für den Einsatz innerhalb von Meßobjekten geeignet. Die Einsatzmöglichkeit der Sensoren bei Einbettung in Betonbauteile wurde in [90] gezeigt. Die Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich der Dehnungsempfindlichkeit sind mit der hohen Auflösung von $< 1 \mu\text{m/m}$ erfüllt. Problematisch sind jedoch die möglichen Abtastraten, die durch die Art des elektronischen Abtastsystems bestimmt werden. Mit den derzeitigen technischen Möglichkeiten können Abtastraten von bis zu maximal 80 kHz realisiert werden, die gering unterhalb der in Gleichung (4.1) geforderten Abtastraten liegen. Die Kosten für die Sensoren sind für den vorliegenden Einsatz zur Zeit vergleichsweise noch zu hoch. Somit sind faseroptischer Dehnungssensoren zukünftig eine interessante Alternative, die derzeit jedoch noch nicht einsetzbar ist.

Meßaufnehmer auf DMS-Basis

Dehnungsmeßstreifen (DMS) sind im Vergleich zu den bisher vorgestellten Aufnehmertypen mit Abstand am kostengünstigsten und können daher in größerer Anzahl als nicht wiedergewinnbare Aufnehmer verwendet werden. Obwohl DMS häufig für statische Meßaufgaben verwendet werden, kann die erforderliche Dehnungsempfindlichkeit und Abtastrate zur Abbildung von dynamischen Vorgängen durch die Wahl eines geeigneten DMS erzielt werden. Problematisch ist die Einbettung der DMS im Beton, sie müssen gekapselt oder auf einem geeigneten Körper appliziert werden.

Im Rahmen der Untersuchungen wird als für die Erweiterung der Meßkette geeignete Alternative ein Meßaufnehmer auf DMS-Basis entwickelt.

4.4.2 Entwicklung eines Meßaufnehmers auf DMS-Basis

Im folgenden werden die Zusammenhänge, die für die Dimensionierung des entwickelten Meßaufnehmers maßgebend sind, dargelegt. Zunächst wird kurz das Meßprinzip von DMS erläutert.

Meßprinzip

Wird ein Bauteil äußeren oder inneren Krafteinwirkungen ausgesetzt, treten Verformungen auf, die Dehnungen auch auf der Bauteiloberfläche bewirken. Ist auf der Bauteiloberfläche ein DMS appliziert, folgt dieser den entstehenden Dehnungen und verändert dabei seinen elektrischen Widerstand [39]. Die vorwiegend verwendeten DMS besitzen als messendes Element ein Meßgitter aus einer metallischen Widerstandslegierung. Der Zusammenhang

der relativen Widerstandsänderung $\Delta R/R_0$ des DMS und der in Meßgitterlängsachse verursachten Dehnung ε wird durch die Beziehung:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \varepsilon \quad (4.5)$$

mit dem Proportionalitätsfaktor k beschrieben [73]. Zur Bestimmung relativer Widerstandsänderungen oder zur Bestimmung des Absolutwertes eines Widerstands durch Vergleich wird bei der DMS-Messung die sogenannte Wheatstonesche Brückenschaltung verwendet (Abb. 4.14). Die Grundlagen hierzu sind ausführlich z.B. in [47] erläutert.

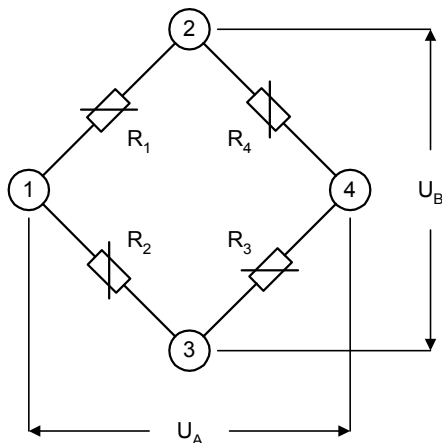


Abb. 4.14: Wheatstonesche Brückenschaltung

Wie in Abb. 4.14 dargestellt, besteht die Schaltung einer Vollbrücke aus vier Einzelwiderständen. Die Brückeneckpunkte 2 und 3 dienen der Brückenspeisung mit der Spannung U_B . An den Punkten 1 und 4 liegt die Ausgangsspannung U_A , d.h. das Meßsignal, an. Die vier Widerstände können in Form von vier aktiven DMS als Vollbrücke auf dem Meßobjekt appliziert werden oder können teilweise durch spezielle Ergänzungswiderstände z.B. im Meßverstärker ersetzt werden. Somit ergeben sich die DMS-Bauformen Viertel- und Halbbrücke [39].

Wahl eines geeigneten DMS

Die Wahl eines geeigneten DMS hängt von vielfältigen Einflußfaktoren ab, wie z.B.:

- Größe und Geometrie des DMS-Meßgitters
- dem elektrischen Widerstand des Meßgitters
- der Höhe der Brückenspeisespannung
- der Wärmeleitfähigkeit des Bauteilwerkstoffes.

Für das Wiedergabevermögen dynamischer Dehnungsvorgänge ist die Meßgitterlänge eines DMS l_{DMS} von entscheidender Bedeutung. Der bei der Stoßwellenausbreitung entstehende

Dehnungssprung durchläuft die Länge des DMS in einer Zeitspanne, die von der Wellengeschwindigkeit abhängig ist. Infolge der Mittelwertbildung eines DMS ist das Verhältnis der Meßgitterlänge zur Grenzwellenlänge λ_{Grenz} des Stoßimpulses für die exakte Wiedergabe des Dehnungssprunges entscheidend. Die Anforderung an dieses Verhältnis kann vergleichbar der Wahl der Elementgröße für die Zeitdiskretisierung (vgl. Kap. 3.3) definiert werden:

$$l_{\text{DMS}} \leq \frac{l_{\text{Grenz}}}{n} \quad (4.6)$$

Mit einer Auflösung von $n = 10$ ist nach [39] bereits eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen. Für den entwickelten Meßaufnehmer wird unter der aus Kap. 4.2 resultierenden Annahme einer Grenzfrequenz von $f_{\text{Grenz}} = \text{ca. } 10 \text{ kHz}$ und einer mittleren Dehnwellengeschwindigkeit von $c_D = 3500 \text{ m/s}$ ein Verhältnis mit $n = 15$ gewählt.

Messungen mit DMS erfolgen häufig an Stoffen mit homogener Materialstruktur. Bei inhomogenen Materialien wie Beton ist die Meßgitterlänge l_{DMS} von wesentlicher Bedeutung, da der Dehnungsverlauf als Mittelwert der Dehnung über die gesamte Meßgitterlänge gemessen wird. Die Inhomogenität des Betons kann nur über eine ausreichende Länge des Meßgitters überwunden werden, welche die Dehnungen im Betonkörper über einen das Größtkorn d einschließenden Bereich mißt. Dadurch erhält man einen Mittelwert für die unterschiedlichen Einflüsse aus der Struktur des Betons und somit kann die minimale Länge l_{DMS} nach [47] in Abhängigkeit des größten Korndurchmesser d definiert werden:

$$l_{\text{DMS}} \geq 3d \quad (4.6)$$

Als weiterer Aspekt ist das Dehnungsaufhebungsvermögen für die Wahl eines geeigneten DMS wesentlich. Der bei der Integritätsprüfung eingeleitete Stoßimpuls bewirkt nur sehr kleine Dehnungen. Dieses erfordert die Möglichkeit einer hohen Signalverstärkung bis zu einem Faktor von 10000 durch den Meßverstärker. Die hohe Signalverstärkung bewirkt ein reaktiv zum Meßsignal großes Nullrauschen und eine hohe Empfindlichkeit bezüglich der Temperaturdrift. Zur Erzielung eines möglichst großen Signaleffekts, d.h. einer großen Amplitude des Meßsignals gegenüber dem Nullrauschen, ist eine hohe Speisespannung der Wheatstoneschen Brückenschaltung erforderlich, die aber zu einer großen Erwärmung der Meßgitterfläche und somit zu einem Temperaturdrift führt. Da ein großer Signaleffekt entscheidend ist, wird eine hohe Speisespannung von 10 V gewählt. Um die Temperaturbeeinflussung zu minimieren, wird in mehreren Versuchsreihen ein möglicher DMS-Typ gefunden. Gewählt wurde eine große Meßgitterfläche und ein hoher elektrischer Widerstand des DMS von 350Ω , bei dem die Beeinflussung durch Temperatureffekte vernachlässigt werden kann.

Um einen möglichst großen Signaleffekt zu erzielen, ist neben der Speisespannung die Anzahl der aktiven Widerstände bzw. DMS entscheidend [47], die an dem Meßobjekt appliziert sind. Speziell für die Messung im Beton entwickelte Einbettungs-DMS in Form von

gekapselten Viertelbrücken müssen durch Spezialwiderstände zur Vollbrücke ergänzt werden. In mehreren Versuchsreihen wird festgestellt, daß der resultierende Signaleffekt für die Erfassung der Wellenausbreitung nicht ausreicht. Daher ist es erforderlich, alle vier Widerstände der Wheatstoneschen Brückenschaltung als aktive DMS in dem Meßobjekt einzubetten. Für den entwickelten Meßaufnehmer werden zwei Halbbrücken gewählt, die zur Vollbrücke verschaltet werden.

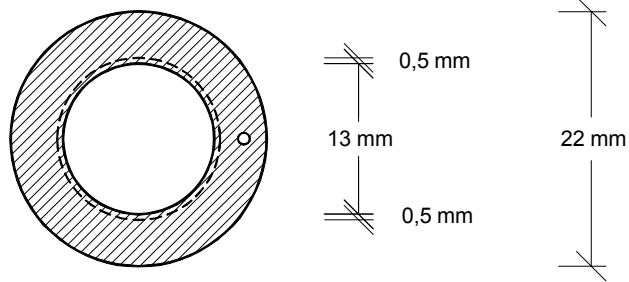
Dimensionierung des Meßaufnehmers

Da keine gekapselten Einbettungs-DMS verwendet werden können, ist ein Körper erforderlich, der als Träger für die Einbettung der DMS in den Betonkörper dient. Aus den Erkenntnissen von mehreren Versuchsreihen an dem in Kap. 4.2 beschriebenen Modellpfahl wird ein Stahlzylinder in Form eines „Meßknochens“ gewählt (Abb. 4.14). Die Dehnsteifigkeit des Stahlzylinders wird so dimensioniert, daß diese im Vergleich zu der Dehnsteifigkeit des Betonpfahles sehr viel geringer ist. Damit ist gewährleistet, daß der Stahlzylinder den Dehnungsänderungen des Betonpfahls folgen kann. Die Formgebung an dem oberen und unteren Ende des Zylinders durch eine Kreistringscheibe bzw. Randerweiterung bewirkt einen über die Gesamthöhe gemittelten Krafteintrag in den Meßaufnehmer. Somit wird die Dehnung über einen das Einzelkorn überspannenden Bereich erfaßt. Die Höhe von 26 mm erfüllt die Anforderung der maximalen Meßgitterlänge nach Gleichung (4.6) mit $n = 15$. Der Durchmesser des Aufnehmers mit 22 mm ergibt sich aus der Meßgitterfläche der gewählten Halbbrücken von 87 mm². Auf dem Zylinder werden gegenüberliegend zwei Halbbrücken appliziert und zur Vollbrücke verschaltet. Um die DMS vor mechanischen und chemischen Einwirkungen zu schützen, wird ein spezielles Abdeckband aus Isoliermasse und Aluminiumfolie verwendet (Abb. 4.15). Dadurch ist gewährleistet, daß kein Krafteintrag über die Meßgitterfläche, sondern nur über die Randerweiterung erfolgt.

Der entwickelte Meßaufnehmer wird an dem in Kap. 4.2 beschriebenen Modellpfahl erprobt und anschließend für die in Kap. 5 vorgestellten Untersuchungen verwendet.

Zur Speisung bzw. Messung der DMS-Aufnehmer ist ein spezieller Meßverstärker erforderlich, der die Anforderungen an die Grenzfrequenz nach Gleichung (4.1) erfüllt. Verwendet wird ein Gleichspannungsmeßverstärker mit einer Bandbreite von 100 kHz.

Draufsicht



Ansicht

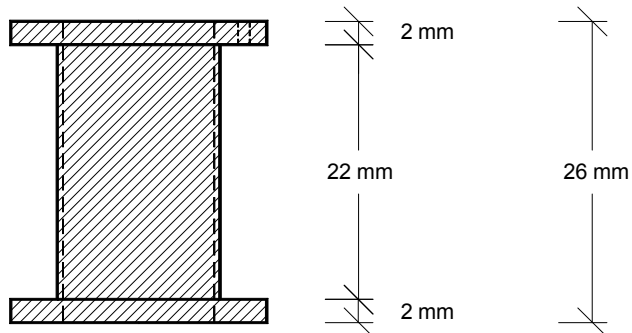


Abb. 4.14: Abmessungen des entwickelten Meßaufnehmers

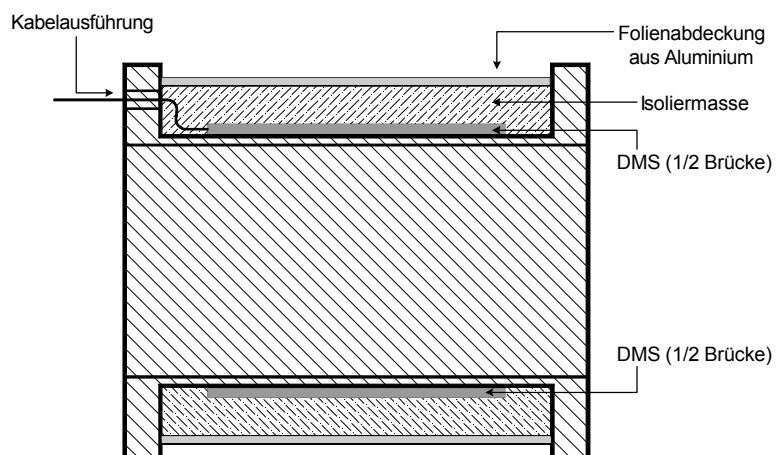


Abb. 4.15: Aufbau des entwickelten Meßaufnehmers

5 Untersuchungen zur Erfassung von Pfahlfehlstellen

Die Untersuchungen zur Erfassung von Pfahlfehlstellen erfolgt in zwei Schritten. Zum einen werden Labormessungen durchgeführt, und zum anderen werden die bei den Messungen gewonnenen Erkenntnisse durch Simulationsberechnungen weiterführend untersucht. Hierbei werden die Grenzen der Fehlstellenauflösung bezüglich der Fehlstellenlage und -ausbildungen in Abhängigkeit der Stoßimpulseinleitung und des Bodeneinflusses betrachtet.

Die Messungen werden an Testpfählen durchgeführt. Zunächst werden das Versuchskonzept und der für die Messungen verwendete Versuchsstand vorgestellt.

5.1 Versuchskonzept und Aufbau eines Versuchsstandes

Die Messungen sollen an Pfählen durchgeführt werden, die möglichst reale Materialeigenschaften und somit reale Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten aufweisen. Diese Voraussetzungen sind von Bedeutung für die Größe und Ausbildung der Stoßwelle bei der Impulseinleitung. Wie in Kap. 4.2 beschrieben, sind für den Frequenzgehalt des Stoßimpulses die Materialeigenschaften von Stoß- und Prallkörper entscheidend. Um den Zusammenhang zwischen der Fehlstellengröße und den Wellenlängen, die aus dem Frequenzgehalt resultieren, zu untersuchen, ist die Abbildung der realen Wellenausbreitungsgeschwindigkeit wichtig. Die Materialeigenschaften wirken sich ebenfalls auf die Untersuchung des Bodeneinflusses durch das Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten im Pfahl und im umgebenden Boden aus. Daher wird für die Untersuchung kein Modellfaktor betrachtet, sondern es werden Testpfähle aus Stahlbeton verwendet.

Die Pfahllänge wird möglichst groß gewählt, um eine maximale Fehlstellenausdehnung zu realisieren. Sie ist aus baulichen Gründen auf $L = 3,5 \text{ m}$ begrenzt. Für ein realistisches Längen-Durchmesser-Verhältnis von $L/d = 17,5$ ergibt sich ein Durchmesser von $d = 0,2 \text{ m}$.

Die Stoßimpulsanregungen erfolgen mit unterschiedlichem Frequenzgehalt. Hierzu werden die in Kap. 4.2 untersuchten Impulseinleitungen mit einem Grenzfrequenzbereich von ca. 1 bis 10 kHz bzw. mit einer Stoßdauer zwischen 0,1 und 1 ms verwendet.

Die Messungen werden mit dem entwickelten Meßsystem, das in Kap. 4.1 vorgestellt wird, durchgeführt. Zur Erfassung räumlicher Wellenausbreitungseffekte am Pfahlkopf werden die Messungen mit mehreren Beschleunigungsaufnehmern an der Pfahlkopfoberfläche durchgeführt. Die in Kap. 4.2 beschriebene Erweiterung der Meßkette mit den entwickelten DMS-Aufnehmern wird in drei zusätzlichen Meßebenen entlang der Pfahlachse umgesetzt.

Die Pfähle werden zunächst freistehend und anschließend mit Bodeneinfluß untersucht, damit die auftretenden Dämpfungseffekte differenziert werden können. Für die Messungen am freistehenden Pfahl wird dessen Lage mit einer Befestigungskonstruktion fixiert. Der Pfahlfuß wird auf einer Holzauflagerung aufgestellt. Für die Berücksichtigung des Bodeneinflusses ist eine spezielle Versuchseinrichtung erforderlich (Abb. 5.1). In dem Versuchsstand können die Testpfähle mit einem definiert eingebauten Boden umgeben werden. Der 2,8 m hohe Versuchsstand besteht aus Trägerbohlwänden mit zwei Kammern,

die jeweils eine Länge und Breite von 1 m aufweisen. In einer Kammer werden die Testpfähle eingestellt und anschließend mit Sand umgeben. Die zweite Kammer dient zur Zwischenlagerung des Sandes während der freistehenden Messungen.

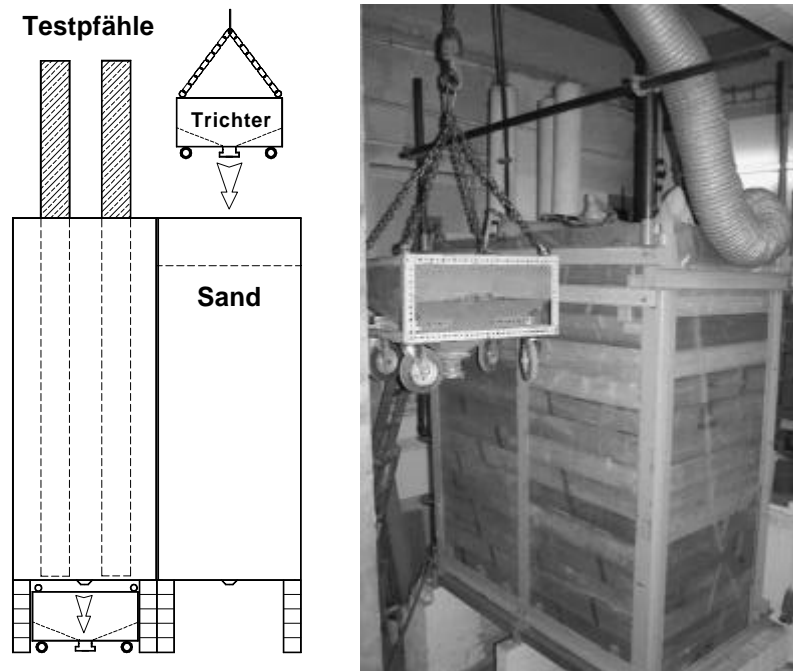
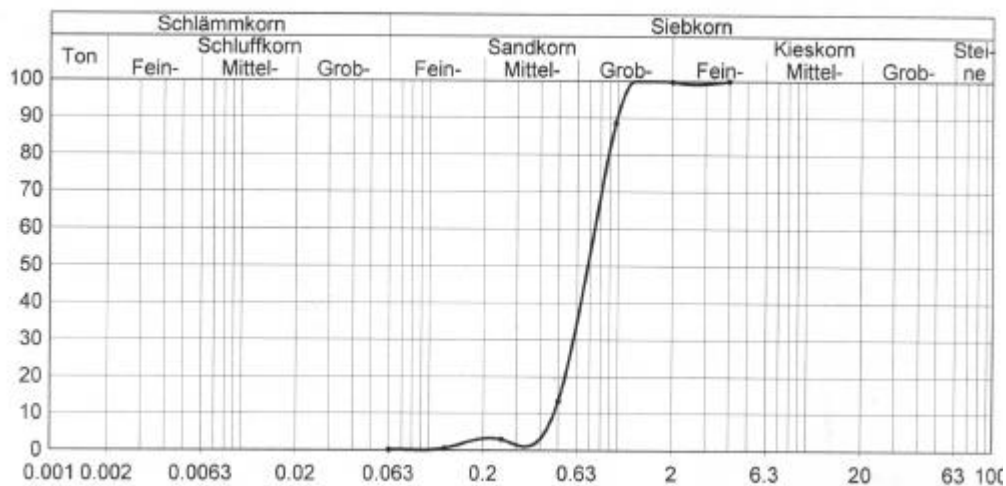


Abb. 5.1: Versuchsstand zur Berücksichtigung des Bodeneinflusses

Für den Bodeneinbau wird ein enggestufter mittelsandiger Grobsand verwendet mit einer Trockendichte von $\rho_d = 1,76 \text{ g/cm}^3$ für die dichteste Lagerung (Tab. 5.1).

Tab. 5.1: Korngrößenverteilung des verwendeten Quarzsandes

Eigenschaften der Körnungslinie			
d_{10}	0,47 mm	Ungleichförmigkeit U Krümmung C_c	1,59
d_{30}	0,58 mm		0,78
d_{60}	0,75 mm		



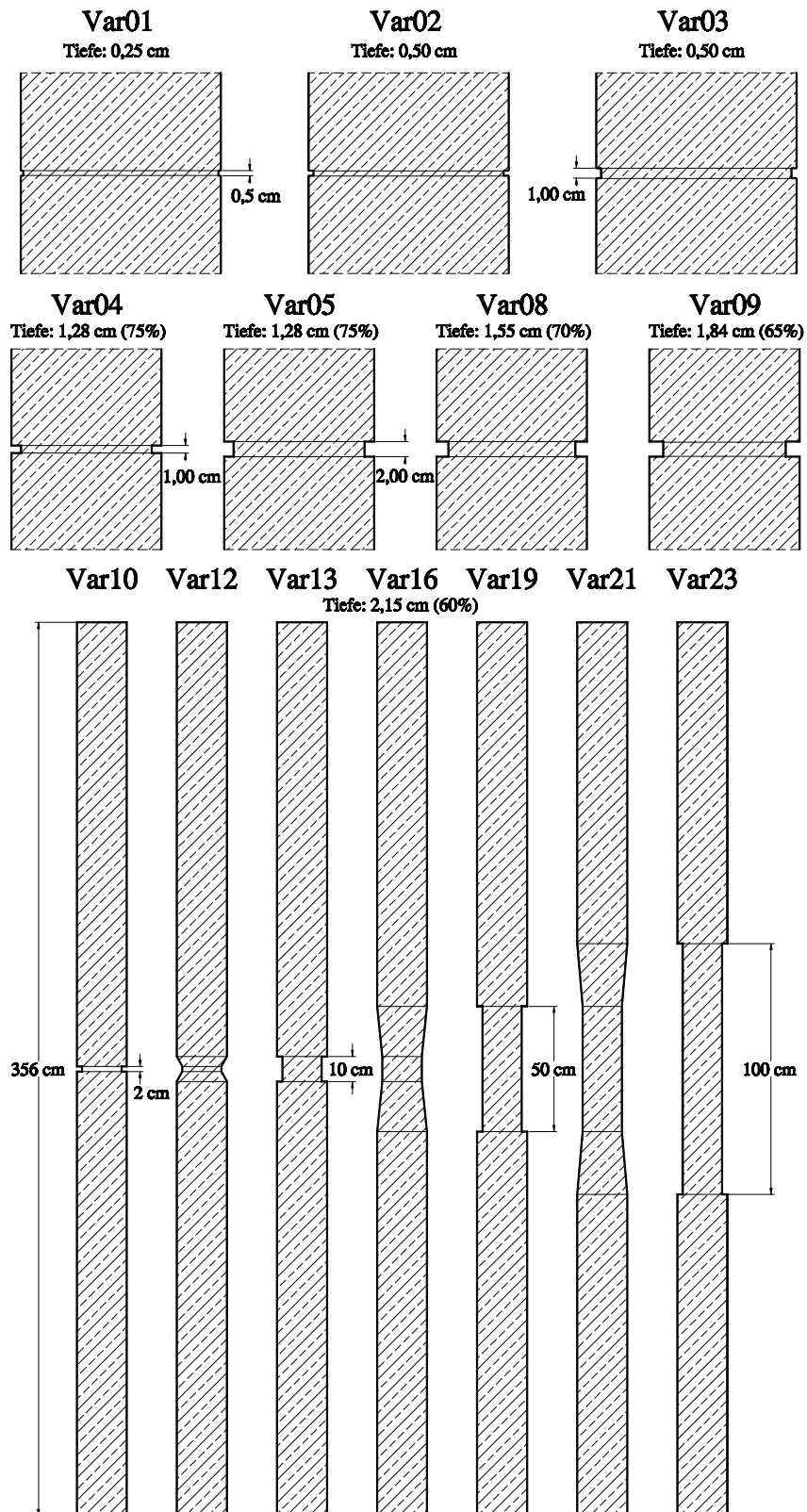


Abb. 5.2: Fehlstellenvariationen am Testpfahl 1

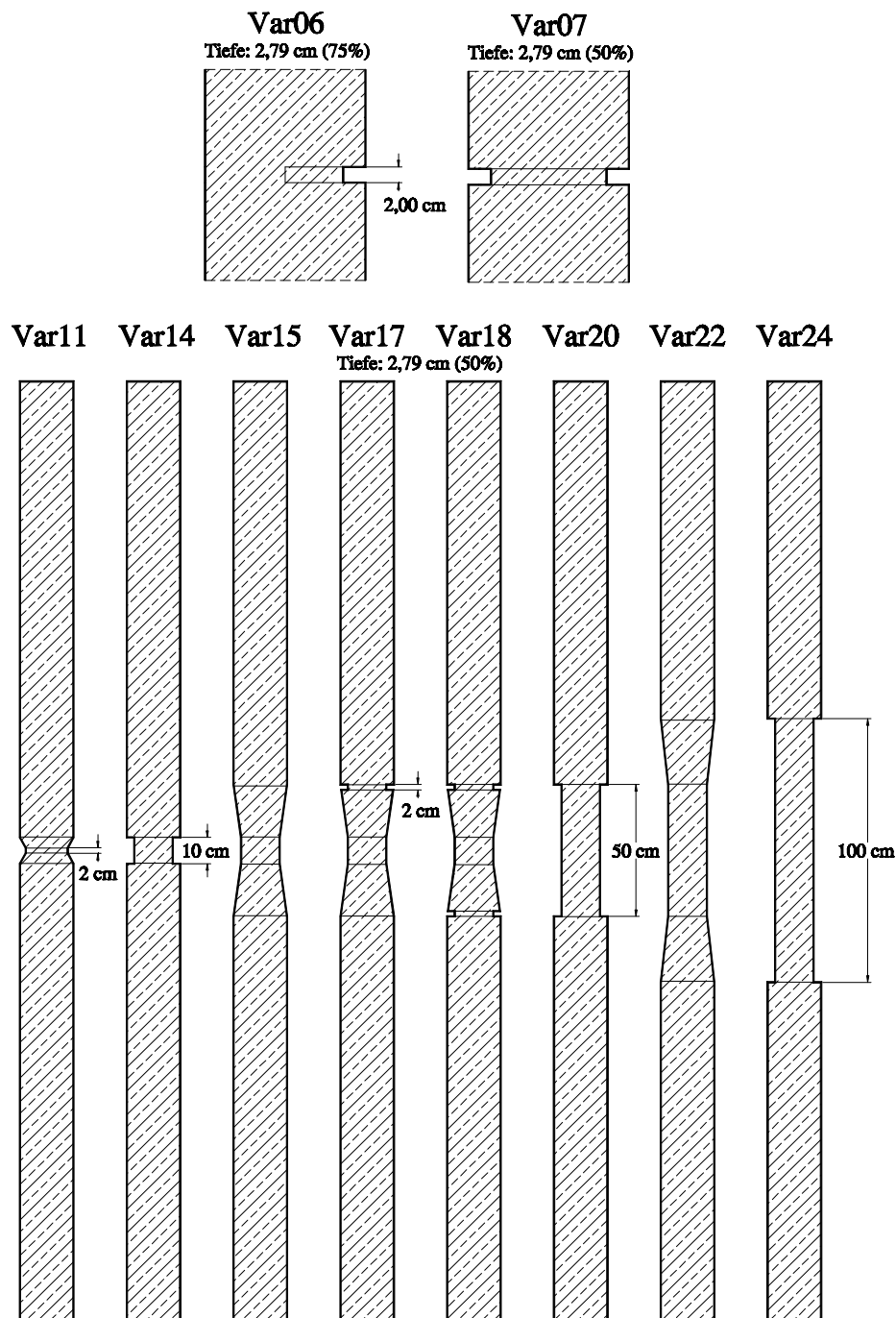


Abb. 5.3: Fehlstellenvariationen am Testpfahl 3

Zur Untersuchung der Fehlstellenauflösung müssen an den Testpfählen Fehlstellen vorgegeben werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese auf Impedanzwechsel infolge Geometrieänderungen beschränkt. Die Messungen werden an drei Testpfählen durchgeführt. Der Testpfahl 2 bleibt als Referenz unversehrt. An den Testpfählen 1 und 3 werden die in Abb. 5.2 und 5.3 gezeigten Fehlstellenvariationen durchgeführt.

Die Fehlstellen werden an dem zunächst unversehrt hergestellten Pfahl schrittweise mit

einem Winkelschleifer hergestellt, so daß die Anzahl der erforderlichen Pfähle auf zwei reduziert werden kann.

Mit den Messungen werden die Aussagemöglichkeiten über die Fehlstellenlage unterhalb des Pfahlkopfs, der Ausdehnung entlang des Pfahlschafts und der Größe der Querschnittsreduzierung untersucht. Hierzu werden Fehlstellenausdehnungen von 0,5 bis 100 cm bei Querschnittsreduzierungen auf bis zu 60 % bei Pfahl 1 und auf 50 % des Ausgangsquerschnitts bei Pfahl 3 hergestellt.

Die Auflösungsgrenze sehr kleiner Fehlstellen in Abhängigkeit hochfrequenter Impulseinleitung wird an Pfahl 1 ermittelt. Die Fehlstelle wird dazu bei den Variationen 1 bis 10 schrittweise sowohl in ihrer Breite als auch in der Tiefe vergrößert.

Die Lage der Fehlstelle wird zur Erzielung einer maximalen Fehlstellenausdehnung für alle Variationen in der Mitte des Pfahlschafts festgelegt. Zur Betrachtung der Aussagemöglichkeiten bezüglich der Fehlstellenform werden sprungartige und allmähliche Querschnittsänderungen vorgegeben. Die Unterscheidungsmöglichkeiten symmetrischer und unsymmetrischer Fehlstellen werden mit den flächengleichen Querschnittsreduzierungen bei den Variationen 6 und 7 an Pfahl 3 untersucht.

Der Einfluß mehrerer Fehlstellen kann aufgrund der begrenzten Pfahllänge nur bedingt untersucht werden. Hierzu wird für die Variation 17 eine zweite Fehlstelle und für Variation 18 eine dritte Fehlstelle mit einer Breite von jeweils 2 cm hergestellt.

In Tab. 5.2 ist eine Übersicht über alle durchgeführten Variationen gegeben. Es wird die reduzierte Querschnittsfläche in der Fehlstelle prozentual zur Ausgangsfläche angegeben. Die Fehlstellenbreite L_1 und L_2 ist bezogen auf die Fehlstellenform der Abb. 5.4 zu entnehmen.

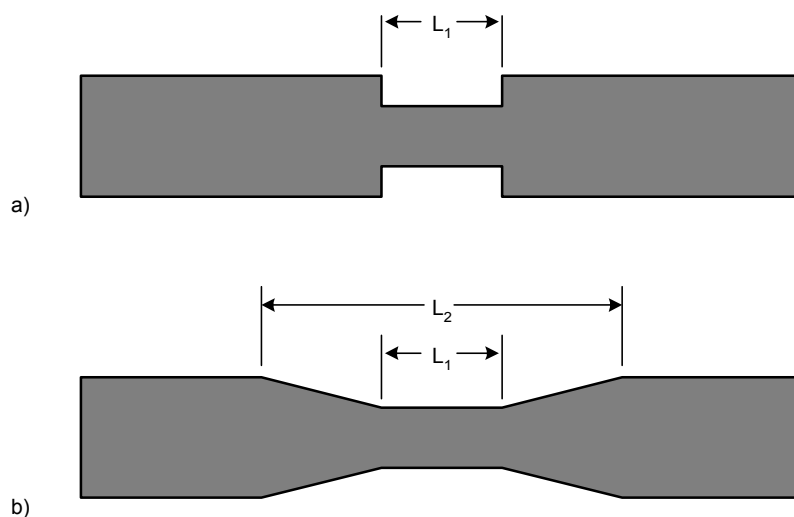


Abb. 5.4: Definition der Fehlstellenbreite

Tab. 5.2: Übersicht der durchgeführten Fehlstellenvariationen

Variation	Pfahl	Fehlstelle					Messung mit Boden
		Restfläche [%]	L ₁ [cm]	L ₂ [cm]	Form	Besonderheit	
1	1	95	0,5	-	sprungartig		
2	1	90	0,5	-	sprungartig		
3	1	90	1	-	sprungartig		
4	1	75	1	-	sprungartig		
5	1	75	2	-	sprungartig		
6	3	75	2	-	sprungartig	unsymmetrisch	
7	3	50	2	-	sprungartig		X
8	1	70	2	-	sprungartig		
9	1	65	2	-	sprungartig		
10	1	60	2	-	sprungartig		X
11	3	50	2	10	allmählich		
12	1	60	2	10	allmählich		
13	1	60	10	-	sprungartig		X
14	3	50	10	-	sprungartig		X
15	3	50	10	50	allmählich		X
16	1	60	10	50	allmählich		X
17	3	50	10	50	allmählich	2 Fehlstellen	
18	3	50	10	50	allmählich	3 Fehlstellen	
19	1	60	50	-	sprungartig		X
20	3	50	50	-	sprungartig		X
21	1	60	50	100	allmählich		X
22	3	50	50	100	allmählich		X
23	1	60	100	-	sprungartig		X
24	3	50	100	-	sprungartig		X

5.2 Herstellung der Testpfähle

Die Testpfähle aus Stahlbeton wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (Fachgebiet Baustoffe und Stahlbetonbau) der TU Braunschweig hergestellt.

Die zylindrischen Pfähle werden mit einer Länge von 3,5 m und einem Durchmesser von 0,2 m hergestellt. Es wird die Betonfestigkeitsklasse B25 mit einer mittleren Druckfestigkeit $\beta_w = 35 \text{ N/mm}^2$ angestrebt. Für den Zuschlag wird ein Größtkorn von 8 mm verwendet und der in der Stoffraumrechnung angesetzte Wasser-Zement-Wert beträgt 0,67 [84]. Für die Betonage wird eine Kunststoffrohrschalung verwendet. Die an Prüfkörpern bestimmte mittlere Druckfestigkeit beträgt nach sieben Tagen $\beta_w = 24 \text{ N/mm}^2$ und nach 28 Tagen $\beta_w = 35 \text{ N/mm}^2$ [42]. Mit der Annahme des Elastizitätsmoduls (B25) von $E = 30.000 \text{ N/mm}^2$ und dem Mittelwert der Trockendichte eines Normalbetons von $\rho = 2,4 \text{ kg/dm}^3$ ergibt sich nach Gleichung (3.6) eine rechnerische Dehnwellengeschwindigkeit von $c_D = 3535 \text{ m/s}$.

Für die Bemessung der Stahlbetonpfähle werden die für den Transport maßgebenden Nachweise der Zugkräfte an den Befestigungslaschen sowie die Biegenachweise als Balken mit und ohne Querschnittsverringering im mittleren Bereich betrachtet. Daraus resultierend werden die Testpfähle mit vier Bewehrungsstäben von 8 mm Durchmesser hergestellt (Abb. 5.5). Bei dem Bewehrungsverlauf muß die Möglichkeit der Vorgabe von Fehlstellen berücksichtigt werden. Für die Fehlstellenvariation 24 mit der größten Ausdehnung und Querschnittsreduzierung ist eine ausreichende Betonüberdeckung zu gewährleisten. Der Bewehrungsverlauf wurde dementsprechend im mittleren Bereich angepaßt (Abb. 5.5).

Die entwickelten DMS-Aufnehmer werden in drei Meßebenen entlang der Pfahlachse während der Herstellung in die Pfähle eingebettet. Hierzu werden die Meßaufnehmer an der Bewehrung fixiert. Die Position der Meßebenen ist Abb. 5.5 zu entnehmen.

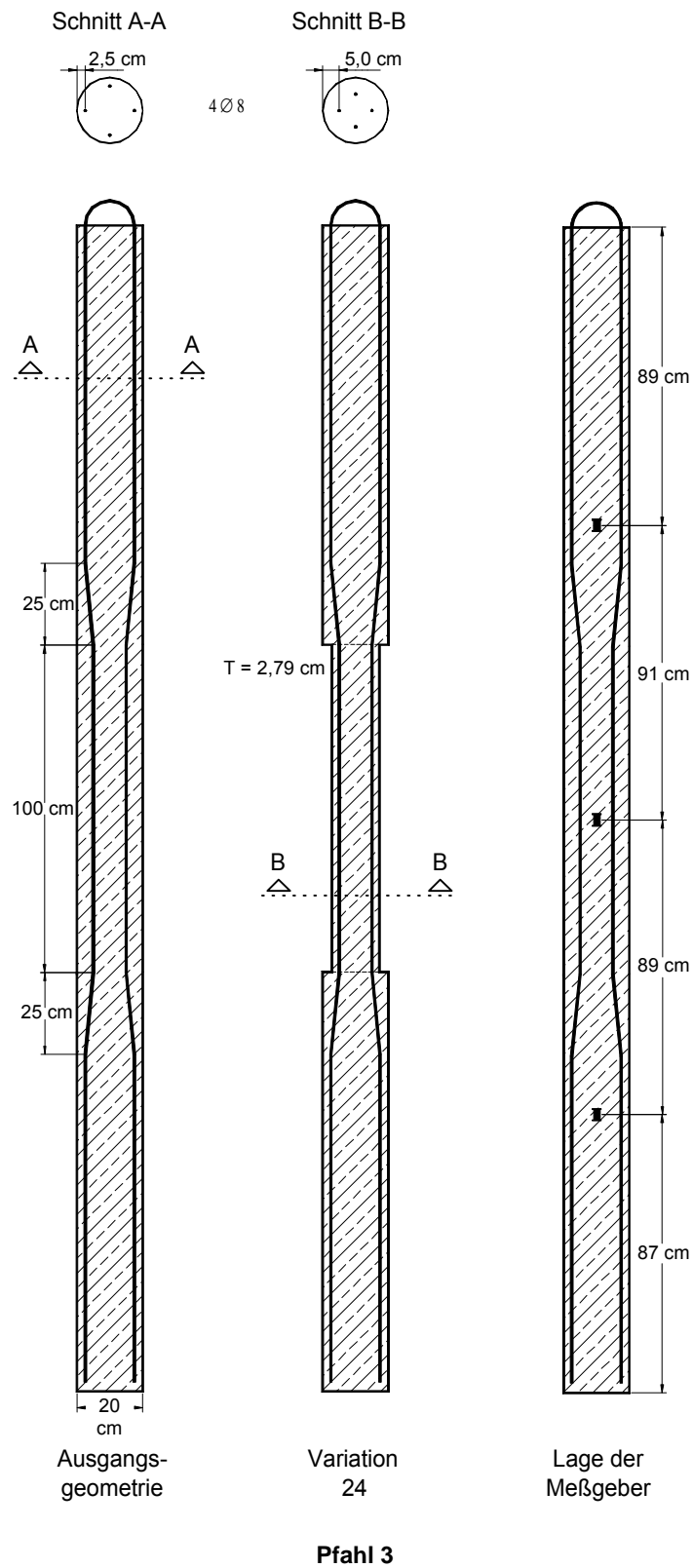


Abb. 5.5: Positionierung der Bewehrung und der DMS-Meßgeber bei der Herstellung der Testpfähle

5.3 Meßdurchführung

Zur Erfassung der Wellenausbreitung in mehreren Meßebenen wird das in Kap. 4.1 vorgestellte Meßsystem erweitert (Abb. 5.6). Neben den Messungen an der Pfahlkopfoberfläche mit mehreren Beschleunigungsaufnehmern erfolgt die Messung der entwickelten DMS-Aufnehmer in drei zusätzlichen Meßebenen entlang der Pfahlachse. Die Komponenten des Meßsystems sind in Kap. 4.1 beschrieben.

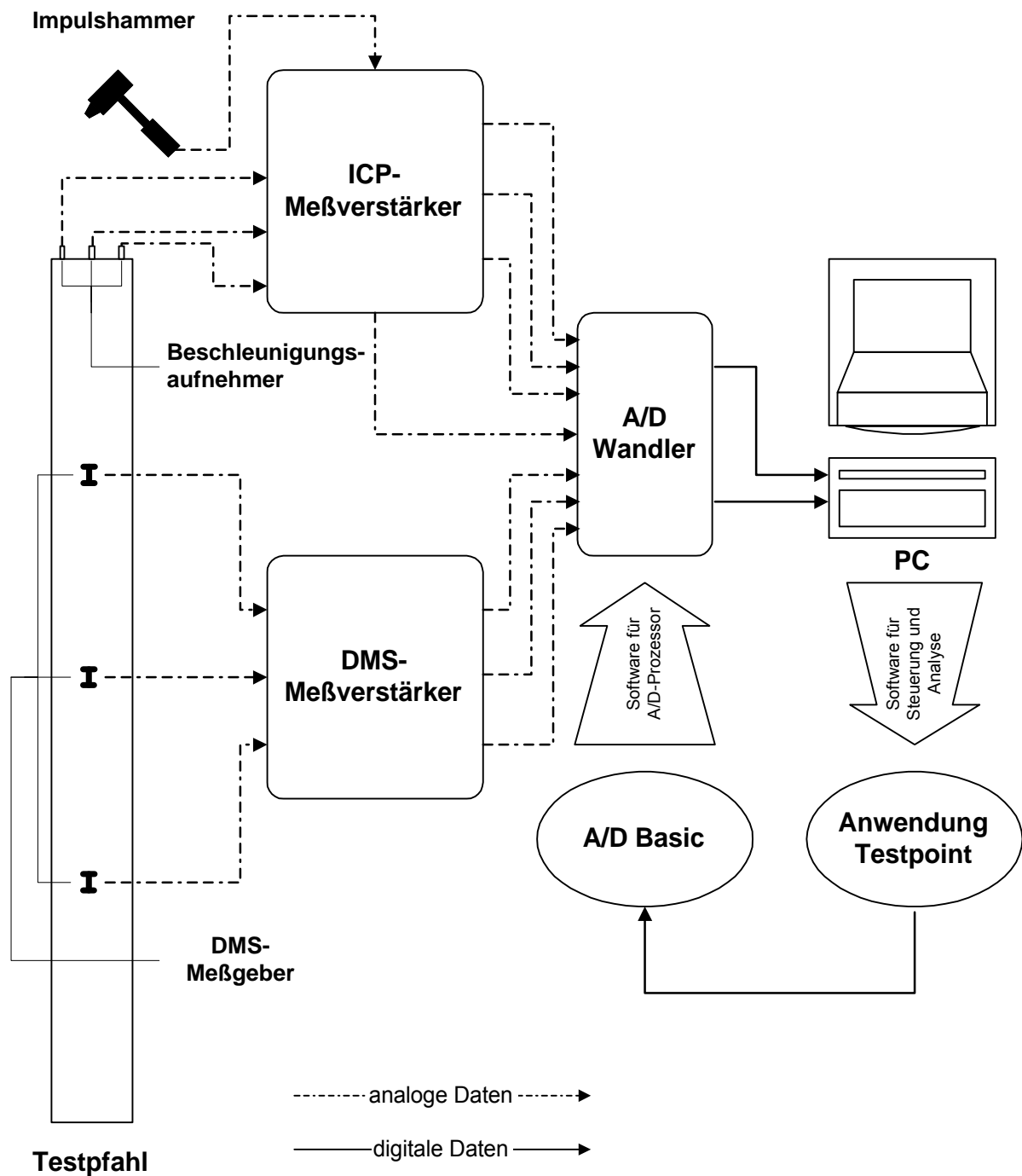


Abb. 5.6: Verwendetes Meßsystem

Als Referenz werden alle Testpfähle zunächst im unversehrten Zustand gemessen. Hierbei erfolgt im ersten Schritt die Messung im freistehenden Zustand. Im zweiten Schritt wird der Bodeneinfluß durch den Sandeinbau berücksichtigt. Für die Vergleichbarkeit des Bodeneinflusses bei allen Messungen ist ein möglichst reproduzierbarer Sandeinbau von Bedeutung [103]. Hierzu wurde der Einfluß mehrerer Einbauarten untersucht. Um einen realistischen Dämpfungseffekt zu erzielen, ist eine Verdichtung des Sandes erforderlich. Die Verdichtung des Sandes wird in fünf Lagen mit Hilfe einer Fallgewichtskonstruktion durchgeführt. Hierbei wird der Ort, die Anzahl der Schläge, die Fallhöhe und das Fallgewicht immer konstant gehalten. Zur Überprüfung des Sandeinbaus werden Rammsondierungen an drei Meßstellen mit einer leichten Rammsonde durchgeführt. Dabei wird ein Sondenstab mit einer Sondenspitze unter definierter Arbeit in den Boden getrieben und die Anzahl der Schläge pro 10 cm Einbringung registriert. Es kann eine annähernd gleichmäßige Lagerungsdichte des Sandes erreicht werden. Beispielhaft ist das Ergebnis einer Rammsondierung in Abb. 5.7 dargestellt.

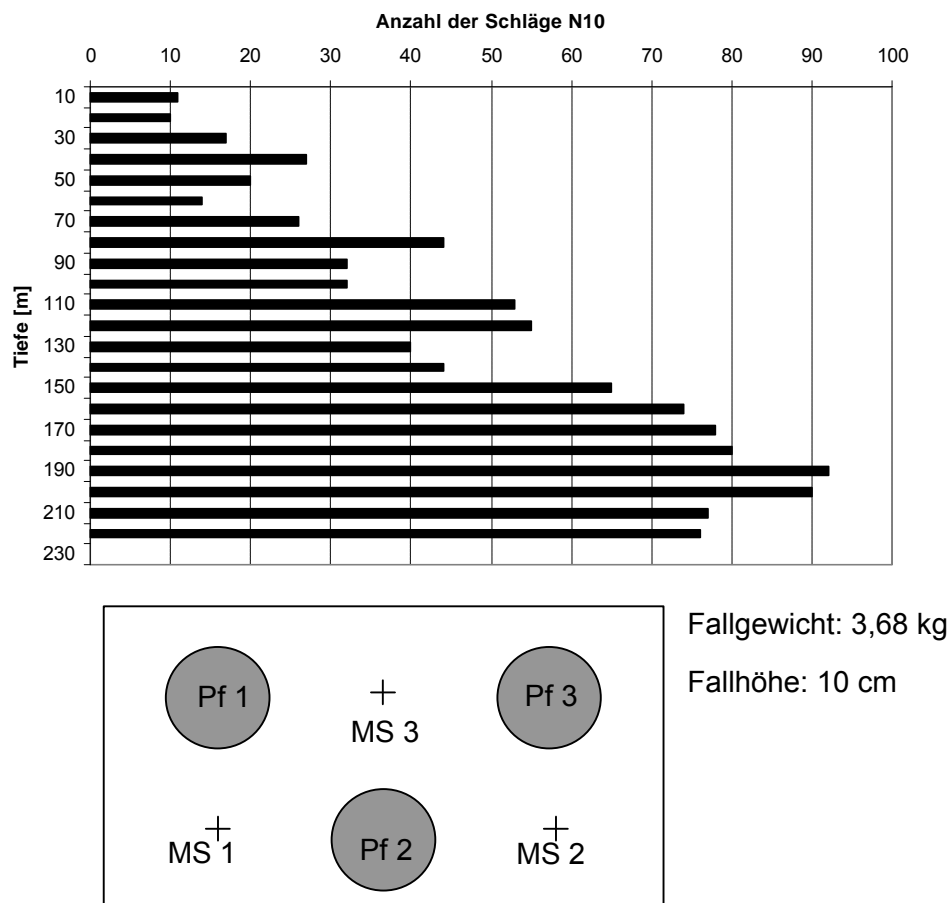


Abb. 5.7: Sondierung zur Nullmessung an Meßstelle (MS) 1

Generell kann festgestellt werden, daß der Einfluß der Lagerungsdichte für die Testpfahlmessungen relativ gering ist. Gezielt vorgegebene Schwankungen der Lagerungsdichte bewirken nur eine homogene Dämpfung des Meßsignals. Der erreichte Einfluß der Bodendämpfung, bezogen auf einen Meter Pfahllänge, ist mit Baustellenmessungen vergleichbar. Aufgrund der begrenzten Länge der Testpfähle ist die resultierende Gesamtdämpfung über die Laufstrecke der Stoßwelle gering.

Im Anschluß an die Referenzmessung erfolgen die Messungen der Geometrieviationen entsprechend Tab. 5.2 nacheinander mit und ohne Bodeneinfluß. Zu jeder Geometrieviation einschließlich der Referenzmessung wird eine Meßreihe durchgeführt. Diese besteht im ersten Teil aus der Messung am Pfahlkopf mit drei Beschleunigungsaufnehmern, die über den Pfahlquerschnitt verteilt angeordnet sind (vgl. Abb. 5.6). Zur Untersuchung der räumlichen Wellenausbreitung am Pfahlkopf wird der Ort der Impulseinleitung variiert. Die Stoßimpulsanregung erfolgt mit drei Impulsgebern unterschiedlicher Stoßdauer. Im zweiten Teil der Meßreihe erfolgt die Messung mit einem Beschleunigungsaufnehmer am Pfahlkopf und der erweiterten Meßkette entlang der Pfahlachse mit einem Impulsgeber von optimaler Stoßdauer.

5.4 Ergebnisse und Bewertung der Messungen sowie der Simulationsberechnungen

Zur Beurteilung der Pfahlfehlstellen anhand der gemessenen Geschwindigkeits- und Kraftverläufe wird neben den Wellenreflexionen an den Fehlstellen die Änderung der mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit als Symptom betrachtet. Zunächst werden hierzu die Fehlstellen mit einer sprunghaften Impedanzänderung herangezogen. Anschließend werden die Auswirkungen allmählicher und unsymmetrischer Impedanzänderungen vorgestellt. Weitere Einflüsse auf die Wellenausbreitung können aus den Testpfahlmessungen abgeleitet werden.

Zur weiterführenden Untersuchung der bei den Messungen gewonnenen Erkenntnisse werden Simulationsberechnungen auf Basis der FEM durchgeführt. Die Grundlagen der Simulationsberechnungen sind in Kap. 3.3 erläutert. Entsprechend der jeweiligen Problemstellung werden die Berechnungen mit dem beschriebenen eindimensionalen oder rotationssymmetrischen Modell durchgeführt. Hierzu wird im Rahmen der Arbeit ein Berechnungsmodul mit dem Programmsystem ANSYS erstellt, mit dem die Wellenausbreitung in beliebigen Pfahlgeometrien in Abhängigkeit variabler Pfahlmaterial- und Bodeneigenschaften simuliert werden können.

5.4.1 Änderung der mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit

Bei der Auswertung eines Meßsignals kann bei bekannter Betongüte bzw. Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_D die Pfahllänge L anhand der Laufzeitdifferenz T zwischen Impulseinleitung und Pfahlfußreflexion bestimmt werden (vgl. Abb. 5.10):

$$T = \frac{2L}{c_D} \quad (5.1)$$

Ist die Pfahllänge wie bei den Testpfählen bekannt, kann die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit sehr exakt bestimmt werden.

Aufgrund der Abhängigkeit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c_D von den Materialeigenschaften nach der Gleichung (3.6) ändert sich c_D im Bereich einer

Materialfehlstelle. Neben Wellenreflexionen führt eine Materialfehlstelle zu einer Änderung der Laufzeitdifferenz T (Abb. 5.8).

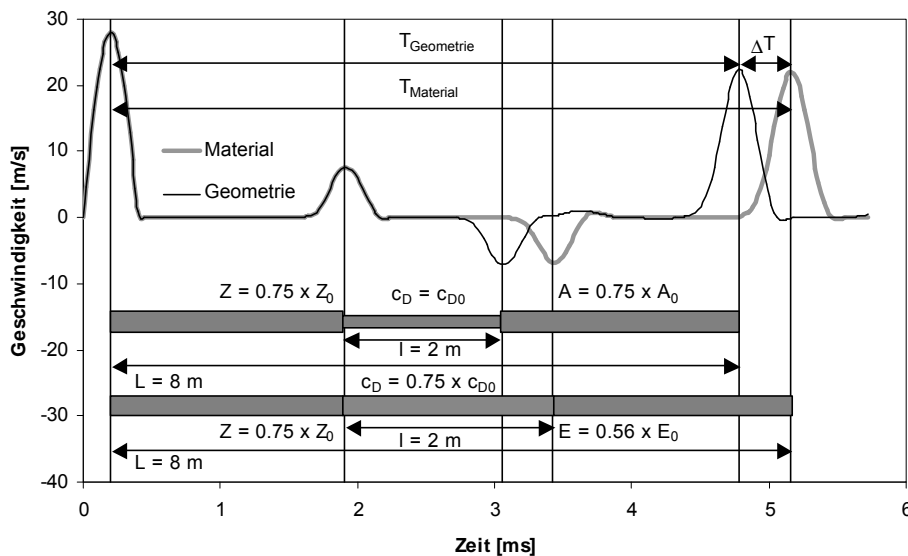


Abb. 5.8: Vergleich des simulierten Geschwindigkeitsverlaufs am Pfahlkopf für eine Geometrie- und Materialfehlstelle bei gleich großem Impedanzwechsel

Betrachtet man wie im vorliegenden Fall Geometriefehlstellen, tritt unter der Annahme einer eindimensionalen Wellenausbreitung keine Änderung von c_D und T auf. Bei der Betrachtung der Mehrdimensionalität der Ausbreitung kann eine Änderung der resultierenden mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit c abgeleitet werden. Dieser Effekt wird in ähnlicher Form rechnerisch in [45] betrachtet. Bei Messungen wird der Effekt bislang aufgrund ungenügender Meßgenauigkeit nicht erfaßt oder als Meßfehler vernachlässigt.

Zur Erklärung dieses Effektes wird die in Kap. 3.1 erläuterte, eindimensionale Wellenausbreitung in genügend schlanken Pfählen betrachtet. Die resultierende Dehnwelle als Form einer Mischwelle besteht aus Kompressions- und Scherwellenanteilen. Tritt eine Geometriefehlstelle entlang der Pfahlachse auf, kommt es zu einer Störung der eindimensionalen Dehnwellenausbreitung und die resultierende Gruppenwellengeschwindigkeit vermindert sich lokal [45].

5.4.1.1 Vorgehen zur Bestimmung der Wellengeschwindigkeitsänderungen

Die Erfassung der Wellengeschwindigkeitsänderung wird bezogen auf die Prüfmethode anhand der Testpfahlmessungen untersucht. Hierbei werden die Referenzmessungen als Bezug für die Größe der Geschwindigkeitsänderungen festgelegt. Zur Beurteilung werden die gemessenen Beschleunigungsverläufe am Pfahlkopf und die Dehnungsverläufe in den zusätzlichen Meßebenen verwendet. Der Beschleunigungsverlauf am Pfahlkopf als eigentliche Meßgröße ist beispielhaft in Abb. 5.9 dargestellt. Der zeitliche Verlauf der Beschleunigung gibt die in Kap. 4 erläuterten meßtechnischen Rahmenbedingungen bzw. Störeinflüsse wieder. Während der Impulseinleitung ist das Einschwingverhalten des

Meßaufnehmers deutlich zu erkennen. Dieses erschwert u.a. die Auswertung des Meßsignals bereits für den unversehrten Zustand der Referenzmessung ohne zusätzliche Fehlstellenreflexionen.

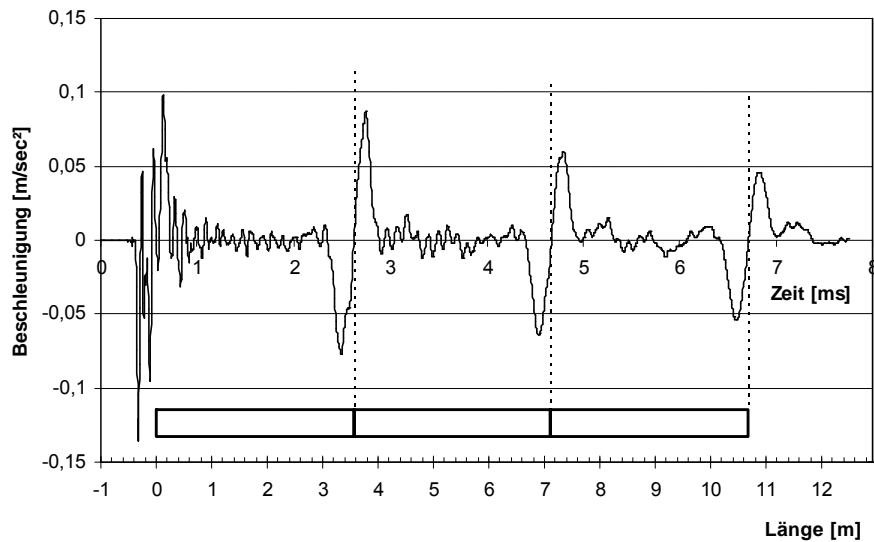


Abb. 5.9: Beschleunigungsverlauf am Pfahlkopf bei der Referenzmessung von Pfahl 1

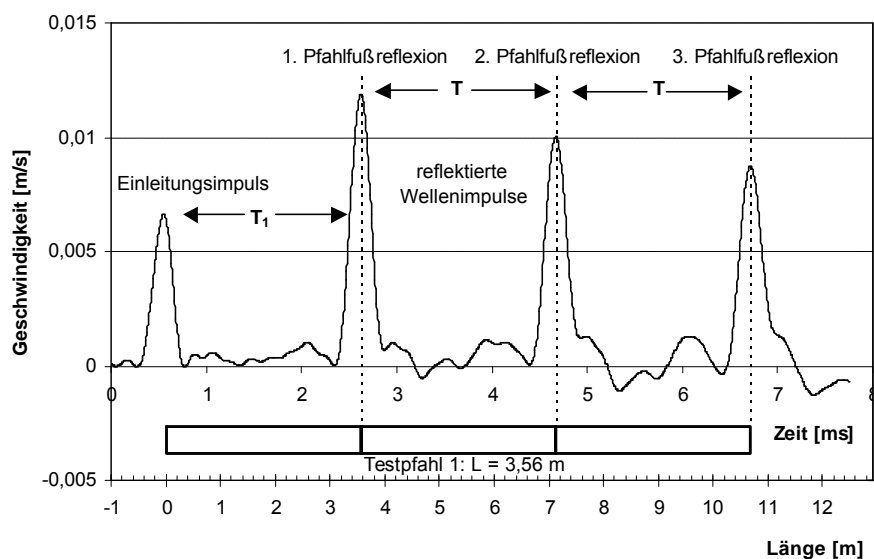


Abb. 5.10: Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf bei der Referenzmessung von Pfahl 1

Zur Interpretation wird wie bei der Standardauswertung der durch die Integration geglättete Geschwindigkeitsverlauf herangezogen (Abb. 5.10). Über die gemessene Laufzeitdifferenz T wird bei exakt bekannter Pfahllänge die mittlere Wellengeschwindigkeit nach Gleichung (5.1) bestimmt. Aufgrund der punktuellen Impulseinleitung am Pfahlkopf erfolgt die Wellenausbreitung halbkugelförmig bis sich bei ca. zweifachem Pfahldurchmesser eine ebene Dehnwelle ausgebildet. Bis zur Ausbildung der ebenen Wellenfront ist von einer Gruppengeschwindigkeit auszugehen, die geringer als die Dehnwellengeschwindigkeit ist. Dieses kann an den unterschiedlichen Laufzeitdifferenzen der Reflexionspeaks eines

Meßsignals verifiziert werden. Um diese Geschwindigkeitsreduktion vernachlässigen zu können, wird zur Untersuchung der Wellengeschwindigkeitsänderung infolge der Geometriefehlstellen nicht die Laufzeitdifferenz T_1 zwischen der Impulseinleitung und der ersten Pfahlfußreflexion, sondern die Zeitdifferenz T zwischen den Fußreflexionen (vgl. Abb. 5.10) herangezogen. Dieses hat den Vorteil, daß Ungenauigkeiten, die aus dem Einschwingverhalten des Meßaufnehmers bei der Impulseinleitung resultieren (vgl. Abb. 5.9), nicht in die Auswertung eingehen.

Zur Beurteilung der Wellengeschwindigkeitsänderung werden neben dem Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf die mit den DMS-Aufnehmern in den zusätzlichen Ebenen gemessenen Dehnungs- bzw. Kraftverläufe herangezogen (Abb. 5.11 und 5.12). Entsprechend dem verwendeten Meßsystem können vier Signale gleichzeitig gemessen werden.

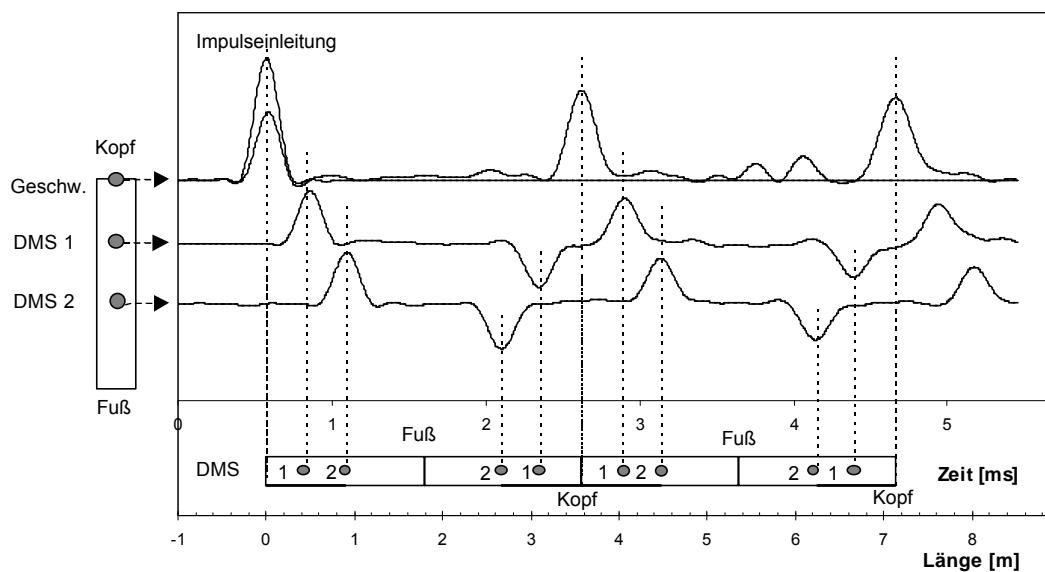


Abb. 5.11: Kraftverlauf der Impulseinleitung und Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf sowie Kraftverlauf in zwei zusätzlichen Meßebenen bei der Referenzmessung am Pfahl 1

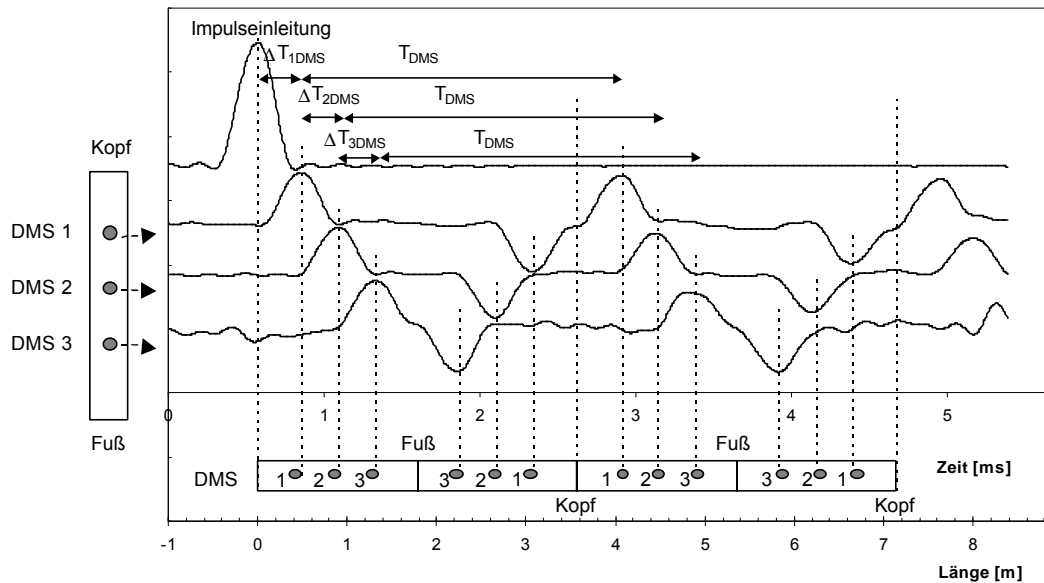


Abb. 5.12: Kraftverlauf der Impulseinleitung am Pfahlkopf und Kraftverlauf in den zusätzlichen drei Meßebenen bei der Referenzmessung am Pfahl 1

Die mittlere Wellengeschwindigkeit kann mit den Laufzeitdifferenzen T_{DMS} innerhalb jeder weiteren Meßebeane bestimmt werden (vgl. Abb. 5.12). Zudem werden die Laufzeitdifferenzen ΔT_{DMS} zwischen den Meßebeanen ausgewertet. Zur Beurteilung der Wellengeschwindigkeitsänderung muß die erzielbare Genauigkeit des Meßsystems betrachtet werden. Mit der möglichen Abtastfrequenz des A/D-Wandlers von 200 kHz bei vier Meßkanälen ergibt sich eine Genauigkeit bei der Bestimmung der Wellengeschwindigkeit von ca. ± 10 m/s. Diese Tatsache begrenzt die Aussagemöglichkeiten für die geringe Änderung der Fehlstellengröße bei den Variationen 1 – 10 (vgl. Tab. 5.2). Eine weitere Begrenzung der Aussagemöglichkeiten ist durch die Lage der Fehlstelle entlang des Pfahls begründet. Hierdurch kommt es ab einer bestimmten Fehlstellengröße zu einer Überlagerung der Reflektionen von Pfahlfuß und Fehlstelle (Abb. 5.13).

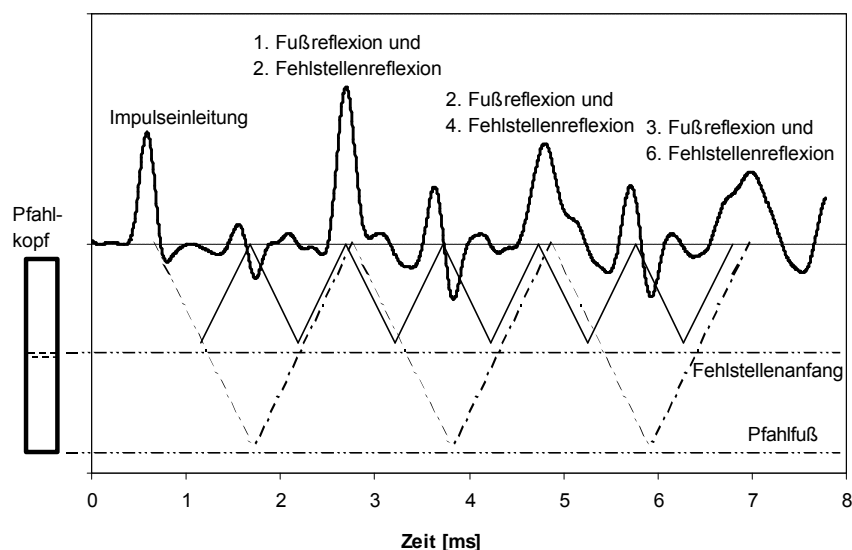


Abb. 5.13: Überlagerung von Fuß- und Fehlstellenreflexion

Die Überlagerung wirkt sich bei den Testpfahlmessungen erst ab einer Fehlstellenbreite von 50 cm (Variationen 19 – 24) signifikant auf die Bestimmung der Laufzeitdifferenzen aus. Bei größeren Fehlstellenbreiten tritt die Reflexion des Fehlstellenanfangs vor der Pfahlfußreflexion auf. Da die Reflexionsanteile nicht differenzierbar sind, kann die Gesamtlaufzeitdifferenz T für diesen Fall nicht eindeutig bestimmt werden.

5.4.1.2 Ermittelte Wellengeschwindigkeitsänderungen

In den Abb. 5.14 bis 5.17 sind beispielhaft vier ermittelte Geschwindigkeitsverläufe der durchgeführten Geometrievariationen dargestellt. Die Stoßwellenanregung erfolgt hierbei mit dem Impulshammer 1 (vgl. Kap. 4.1.2).

Die Referenzmessung ohne Fehlstelle und ohne Bodeneinfluß an Pfahl 1 ist in Abb. 5.14 abgebildet. Neben der Pulseinleitung und den Pfahlfußreflexionen sind hierbei die weiteren Verlaufsänderungen nicht auf Fehlstellen, sondern im wesentlichen auf meßtechnische Einflüsse, räumliche Wellenausbreitungseffekte und geringe Schwankungen der Materialeigenschaften zurückzuführen. Diese zusätzlichen Änderungen spiegeln realistisch die Einflüsse wieder, die auch bei in situ Messungen auftreten. Anhand der Pfahlfußreflexionen wird über die Laufzeitdifferenz T die mittlere Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt, die als Bezug für die Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung verwendet wird.

Der Geschwindigkeitsverlauf bei der Variation 1 mit einer 0,5 cm breiten Fehlstelle in der Pfahlmitte an Pfahl 1 ohne Bodeneinfluß ist in Abb. 5.15 dargestellt. Bei dieser kleinen Fehlstelle ist das Reflexionsspektrum annähernd identisch mit dem Spektrum der Referenzmessung. Es können keine zusätzlichen Fehlstellenreflexionen lokalisiert werden. Die Bestimmung der mittleren Wellengeschwindigkeit ergibt hingegen eine signifikante Änderung der Geschwindigkeit gegenüber der Referenzmessung.

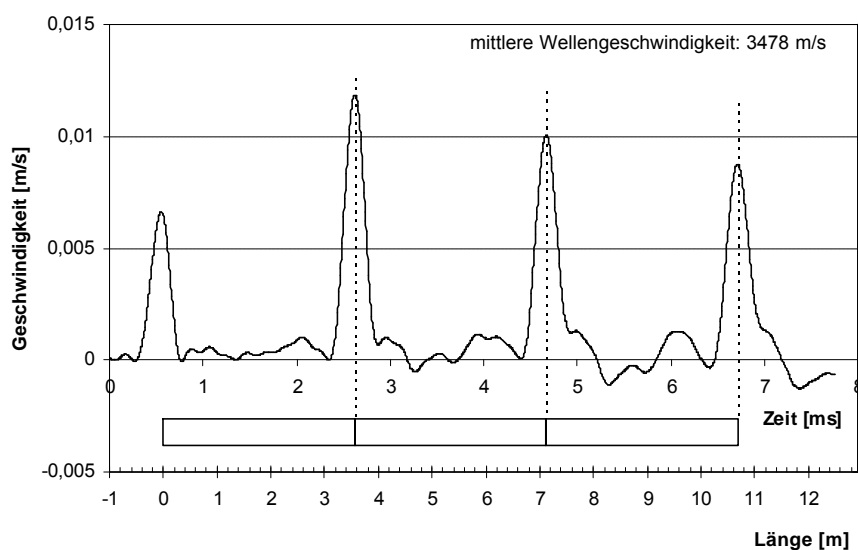


Abb. 5.14: Geschwindigkeitsverlauf bei der Referenzmessung ohne Fehlstelle am Pfahl 1 ohne Bodeneinfluß

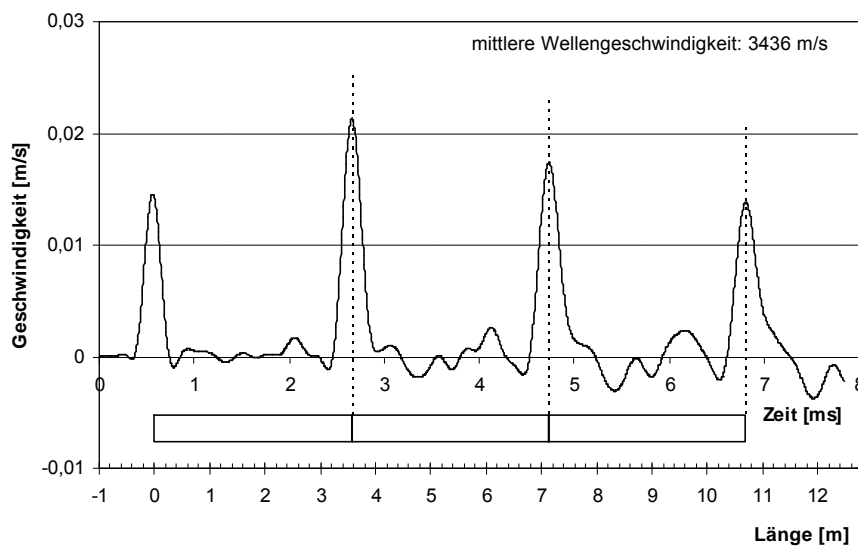


Abb. 5.15: Geschwindigkeitsverlauf bei Variation 1 mit einer 0,5 cm breiten Fehlstelle in der Pfahlmitte am Pfahl 1 ohne Bodeneinfluß

Die Geometrievariationen 2 – 9 zur Untersuchung der Auflösungsgrenze sehr kleiner Fehlstellen zeigen ähnliche Ergebnisse wie bei Variation 1. Es können zwar keine Fehlstellenreflexionen lokalisiert werden, aber es ist eine Reduzierung der mittleren Wellengeschwindigkeit feststellbar. Auch die Variation der Impulseinleitung führt zu keinen weiterführenden Ergebnissen. Bei hochfrequenter Anregung mit einer Stahlkugel (vgl. Kap. 4.1.2) kommt es übereinstimmend mit der Begrenzung der minimalen Stoßdauer nach Gleichung (4.3) zu Überlagerungen mit horizontalen Querschwingungen, die eine Lokalisierung von Fehlstellenreflexionen unmöglich machen. Die Änderung der Wellengeschwindigkeit hingegen kann auch bei der Variation der Impulseinleitung bestätigt werden.

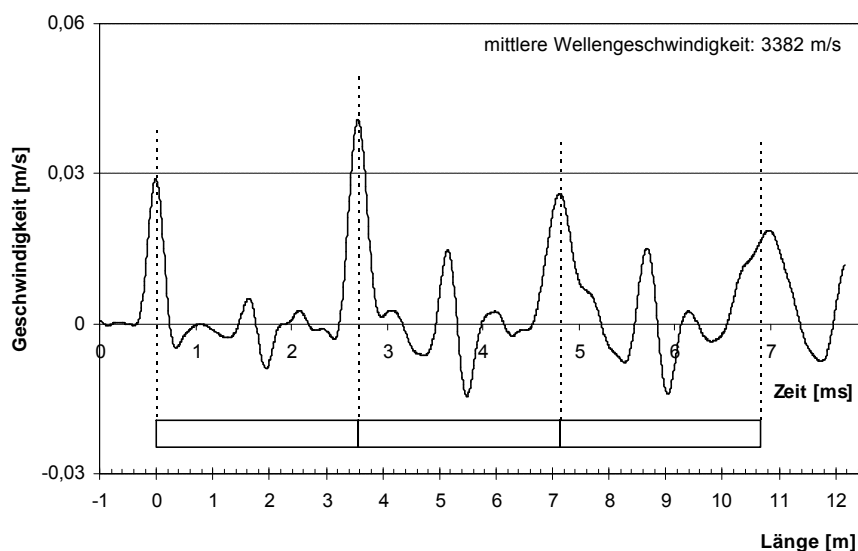


Abb. 5.16: Geschwindigkeitsverlauf bei Variation 13 mit einer 10 cm breiten Fehlstelle in der Pfahlmitte am Pfahl 1 ohne Bodeneinfluß

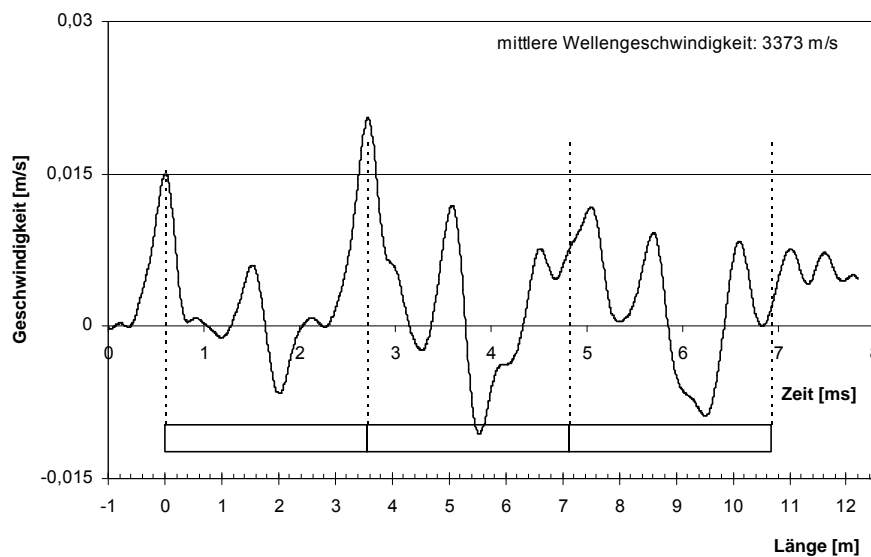


Abb. 5.17: Geschwindigkeitsverlauf bei Variation 19 mit einer 50 cm breiten Fehlstelle in der Pfahlmitte am Pfahl 1 ohne Bodeneinfluß

Ab der Geometrievariation 10 mit einer Fehlstellenbreite von 2 cm und einer Querschnittsreduzierung auf 60% des Ausgangsquerschnitts kann neben der Wellengeschwindigkeitsänderung auch eine deutliche Fehlstellenreflexion lokalisiert werden. Als Beispiel für eine mittlere Fehlstellengröße ist in Abb. 5.16 der Geschwindigkeitsverlauf bei Variation 13 mit einer 10 cm breiten Fehlstelle in der Pfahlmitte an Pfahl 1 ohne Bodeneinfluß abgebildet. Bei dieser Fehlstellengröße können die Pfahlfußreflexionen und die Fehlstellenreflexionen differenziert werden.

Aufgrund der Lage der Fehlstelle in der Mitte des Pfahlschafts kommt es bei großen Fehlstellen, wie in Kap. 5.4.1.1 beschrieben, zur Überlagerung der Reflexionen vom Pfahlfuß und von der Fehlstelle. Dieses ist aus Abb. 5.17 bei einer 50 cm breiten Fehlstelle in dem zweiten Wellendurchgang erkennbar. Die Wellengeschwindigkeitsänderung kann nicht eindeutig bestimmt werden, da die Reflexionsanteile nicht differenzierbar sind.

Ein Überblick über die ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderungen ist in Tab. 5.3 gegeben. Hierbei ist die mittlere Wellengeschwindigkeit aus der gemessenen Laufzeitdifferenz T (vgl. Abb. 5.10) nach Gleichung (5.1) des Geschwindigkeitsverlaufs und aus der Laufzeitdifferenz T_{DMS} aus den Kraftverläufen (vgl. Abb. 5.12) ermittelt. Die Änderungen sind auf die mittlere Wellengeschwindigkeit der Referenzmessung am unversehrten Pfahl bezogen.

Tab. 5.3: Übersicht der ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderungen

Variation	Geschwindigkeitsverlauf			Kraftverlauf		
	Mittlere Wellen- geschwindigkeit	Geschwindigkeits- änderung		Mittlere Wellen- geschwindigkeit	Geschwindigkeits- änderung	
	[m/s]	[m/s]	[%]	[m/s]	[m/s]	[%]
Pfahl 1						
Referenz	3478			3490		
1	3436	-42	-1	3422	-68	-2
2	3431	-47	-1	3415	-75	-2
3	3418	-60	-2	3414	-76	-2
4	3421	-47	-1	3412	-78	-2
5	3418	-60	-2	3413	-77	-2
8	3431	-47	-1	3410	-80	-2
9	3427	-51	-1	3412	-78	-2
10	3427	-51	-1	3402	-88	-2
13	3382	-96	-3	3362	-128	-4
19	3376	-102	-3	-	-	
Pfahl 3						
Referenz	3547			3574		
7	3436	-111	-3	3458	-116	-3
14	3427	-120	-3	3448	-126	-3
20	3445	-102	-3	-		

Die Wellengeschwindigkeiten, die sich aus den Geschwindigkeits- und den Kraftverläufen ergeben, stimmen im Rahmen der Genauigkeit des verwendeten Meßsystems gut überein. Um die Wellengeschwindigkeitsänderung zu verdeutlichen, sind die ermittelten mittleren Wellengeschwindigkeiten für ausgewählte Variationen in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite für Pfahl 1 und Pfahl 3 in Abb. 5.18 dargestellt.

Schon bei sehr kleinen Fehlstellenbreiten treten relativ große Wellengeschwindigkeitsänderungen auf. Ab einer Fehlstellenbreite von 10 cm ist keine wesentliche weitere Wellengeschwindigkeitsreduzierung erkennbar. Aufgrund der erläuterten Überlagerungsproblematik kann ab einer Fehlstellenbreite von 50 cm die mittlere Wellengeschwindigkeit nicht bestimmt werden. Die Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeitsänderung von der Größe der Querschnittsreduzierung kann nur begrenzt untersucht werden. Für die Querschnittsreduzierung auf 50 % des Ausgangsquerschnitts von Pfahl 3 ist nur eine minimal größere Wellengeschwindigkeitsabminderung als bei der Querschnittsreduzierung auf 60 % von Pfahl 1 festzustellen (vgl. Tab. 5.3).

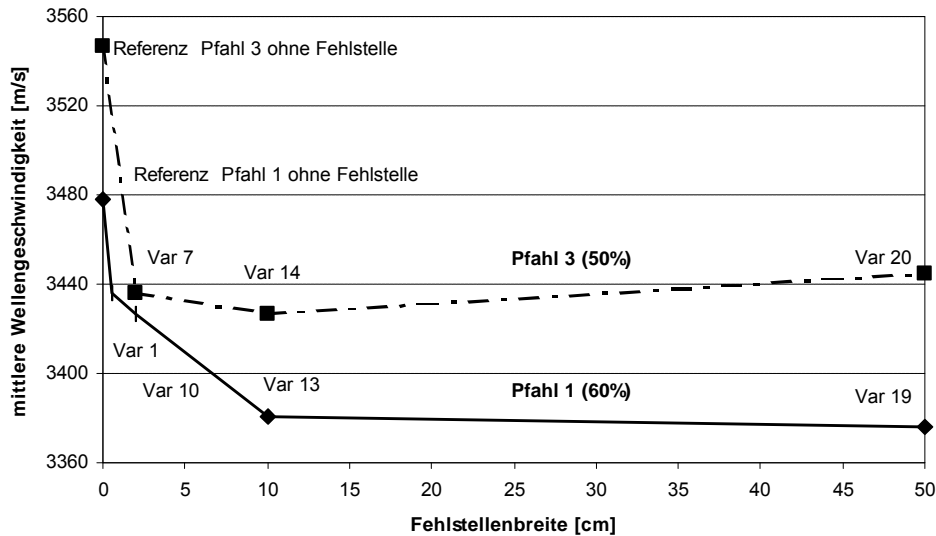


Abb. 5.18: Ermittelte mittlere Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite für Pfahl 1 und 3

Bezüglich der Wellengeschwindigkeitsentwicklung ergeben die Messungen mit Bodeneinfluß und mit unterschiedlichen Impulsanregungen keine weiteren Erkenntnisse.

Die Messung der Kraftverläufe in den zusätzlichen Ebenen entlang der Pfahlachse ermöglicht neben der Ermittlung der mittleren Wellengeschwindigkeiten aus der Laufzeitdifferenz T_{DMS} auch die Bestimmung der abschnittswisen Wellengeschwindigkeiten zwischen den Meßebenen aus den Zeitdifferenzen ΔT_{DMS} (vgl. Abb. 5.12).

Die resultierenden abschnittswisen Wellengeschwindigkeiten sind den mittleren Wellengeschwindigkeiten für Pfahl 1 gegenübergestellt (vgl. Abb. 5.19). Der Bereich 1 bezieht sich auf die Laufzeitdifferenz zwischen dem Pfahlkopf- und der oberen DMS-Meßebeine, Bereich 2 bezieht sich auf die Differenz zwischen oberer und mittlerer DMS-Meßebeine in der Pfahlmitte (vgl. Abb. 5.5).

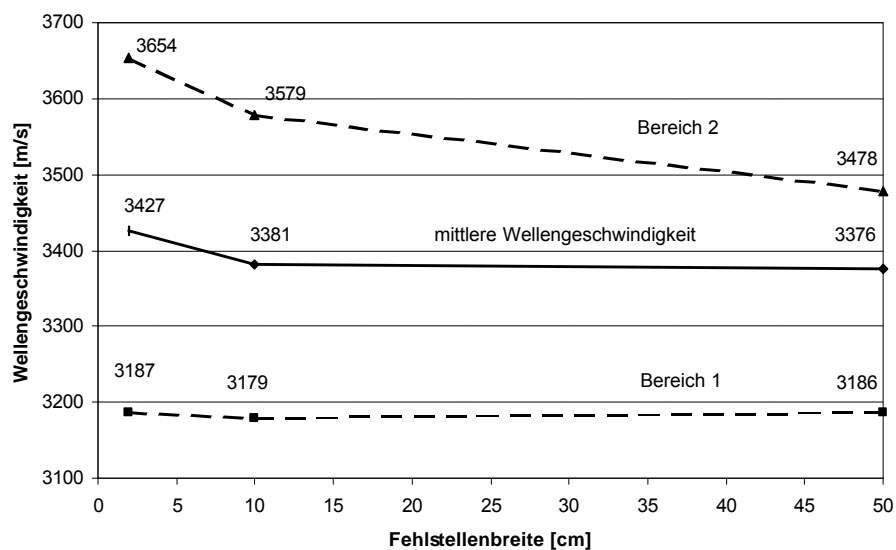


Abb. 5.19: Vergleich der ermittelten mittleren und abschnittswisen Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite für Pfahl 1

Im Bereich 1 oberhalb der Fehlstelle ist keine signifikante Wellengeschwindigkeitsreduzierung festzustellen. Aufgrund der erläuterten räumlichen Ausbreitung im Pfahlkopfbereich infolge der punktuellen Impulseinleitung ist die Geschwindigkeit kleiner als die mittlere Wellengeschwindigkeit. Die Wellengeschwindigkeit im Bereich bis zur Pfahlmitte, Bereich 2, ist größer als die mittlere Wellengeschwindigkeit. Wenn Fehlstellen vorhanden sind, treten in diesem Bereich Geschwindigkeitsreduktionen auf.

Aufgrund meßtechnischer Ungenauigkeiten kann der unterste DMS-Meßaufnehmer (vgl. Abb. 5.5) für die Betrachtung der abschnittswisen Wellengeschwindigkeit nicht herangezogen werden.

5.4.1.3 Simulationsberechnungen zur Untersuchung der Wellengeschwindigkeitsänderungen

Zur weiterführenden Untersuchung der Zusammenhänge der Wellengeschwindigkeitsentwicklung infolge Geometriefehlstellen werden Simulationsberechnungen durchgeführt. Die lokale Reduzierung der resultierenden Gruppengeschwindigkeit tritt infolge einer Störung der eindimensionalen Dehnwellenausbreitung bei einer Geometriefehlstelle auf. Es handelt sich um einen mehrdimensionalen Effekt, der mit einem eindimensionalen numerischen Modell nicht abgebildet werden kann. Für die Berechnungen zur Untersuchung der Wellengeschwindigkeitsänderung wird daher ein rotationssymmetrisches Modell, wie in Kap. 3.3 beschrieben, verwendet.

Die Berechnungen zeigen, daß für die Wahl der Elementgröße nach Gleichung (3.38) mindestens 80 – 100 Elemente pro Grenzwellenlänge erforderlich sind, um eine ausreichende Genauigkeit zur Erfassung der Wellengeschwindigkeitsänderungen zu erzielen.

Die Simulation des Stoßimpulses erfolgt mit einer Stoßdauer von $t_c = 0,4$ ms angepaßt an den bei der Messung erzeugten Stoß mit Impulshammer 1 (vgl. Kap. 4.1.2). Simuliert wird der in Kap. 5.4.1.2 vorgestellte Fall ohne Bodeneinfluß, so daß nur die Dämpfung infolge des Pfahlmaterials bei dem Berechnungsmodell berücksichtigt werden muß. Die Modellparameter werden schrittweise so angepaßt, daß eine möglichst gute Übereinstimmung von berechnetem und gemessenem Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf entsteht.

Mit den Berechnungen wird die Abhängigkeit der Geschwindigkeitsreduzierung von der Fehlstellenbreite und der Fehlstellentiefe bzw. Querschnittsreduzierung untersucht. Zur Simulation möglichst vieler Fehlstellenbreiten und -tiefen erfolgen Parameterstudien. Um die in Kap. 5.4.1.1 erläuterten Reflexionsüberlagerungen aufgrund der Fehlstellenlage zu vermeiden, wird bei der Berechnung eine Pfahlänge von $L = 5$ m und eine Lage der Fehlstellenmitte von 3,3 m unterhalb des Pfahlkopfs simuliert. In Abb. 5.20 ist beispielhaft der simulierte Geschwindigkeitsverlauf ohne Bodeneinfluß mit einer 10 cm breiten Querschnittsreduzierung auf 50 % dargestellt. Die Änderungen des Geschwindigkeitsverlaufs sind hierbei neben der Impulseinleitung und den Pfahlfußreflexionen auf Fehlstellenreflexionen beschränkt. Aufgrund der nicht vorhandenen meßtechnischen Störeinflüsse ist eine eindeutige Interpretation des Geschwindigkeitsverlaufs möglich.

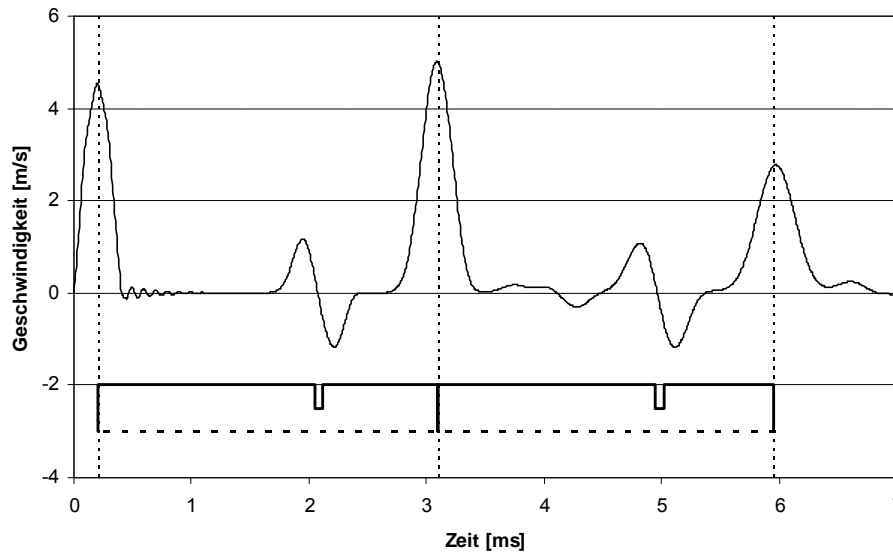


Abb. 5.20: Simulation des Geschwindigkeitsverlaufs ohne Bodeneinfluß mit einer 10 cm breiten Querschnittsreduzierung auf 50 % 3,3 m unterhalb des Pfahlkopfs bei einer Pfahllänge von 5 m

Die Bestimmung der mittleren Wellengeschwindigkeit erfolgt analog zu der Bestimmung bei den gemessenen Geschwindigkeitsverläufen, wie in Kap. 5.4.1.1 erläutert. Zunächst wird der Einfluß der Fehlstellenbreite auf die Wellengeschwindigkeitsentwicklung für eine Querschnittsreduzierung auf 50 % und auf 60 % betrachtet (Abb. 5.21). Es ergibt sich ein qualitativ gleiches Verhalten wie bei den gemessenen Verläufen. Ab einer Fehlstellenbreite von ca. 5 bis 10 cm treten keine weiteren Wellengeschwindigkeitsreduktionen auf. Auch bei einer Pfahllänge von $L = 5$ m ist ab einer Fehlstellenbreite von 30 cm die Problematik der Reflexionsüberlagerungen festzustellen.

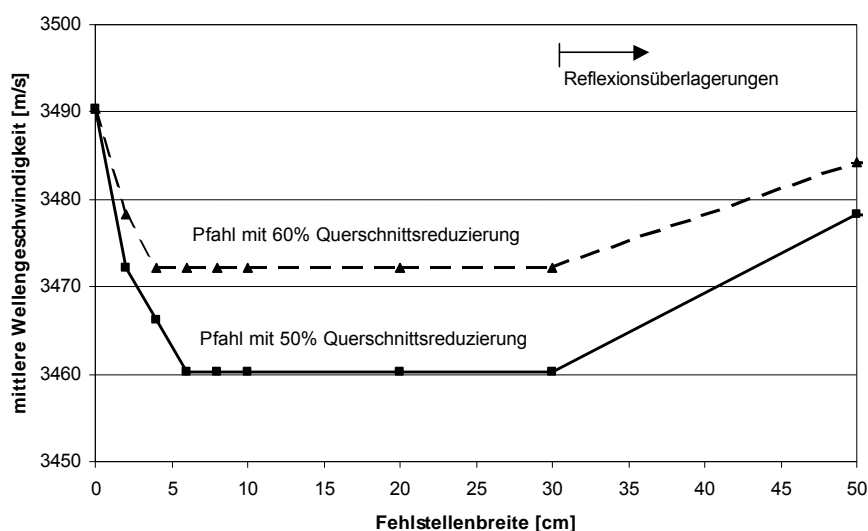


Abb. 5.21: Ermittelte mittlere Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite für eine Querschnittsreduzierung auf 50 % und 60 %

Die Größe der Querschnittsreduzierung wirkt sich deutlich auf den Betrag der Wellengeschwindigkeitsreduktion aus. Daher werden Simulationen für eine konstante Fehlstellenbreite von 10 cm, bei der eine maximale breitenabhängige Geschwindigkeitsreduktion auftritt, und einer schrittweisen Verkleinerung des Querschnitts in der Fehlstelle durchgeführt (Abb. 5.22). Mit zunehmender Querschnittsreduzierung verringert sich die mittlere Wellengeschwindigkeit exponentiell. Ab einer Querschnittsreduzierung von ca. 90 % ist die Fehlstellenreflexion so groß, daß eine Pfahlfußreflexion nicht interpretiert werden kann und somit keine mittlere Wellengeschwindigkeit über die gesamte Pfahllänge bestimmbar ist.

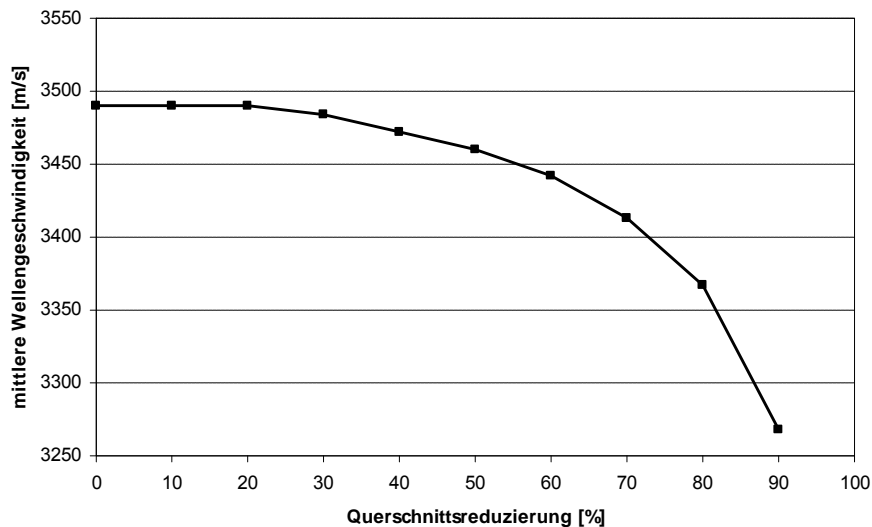


Abb. 5.22: Ermittelte mittlere Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Querschnittsreduzierung für eine Fehlstellenbreite von 10 cm

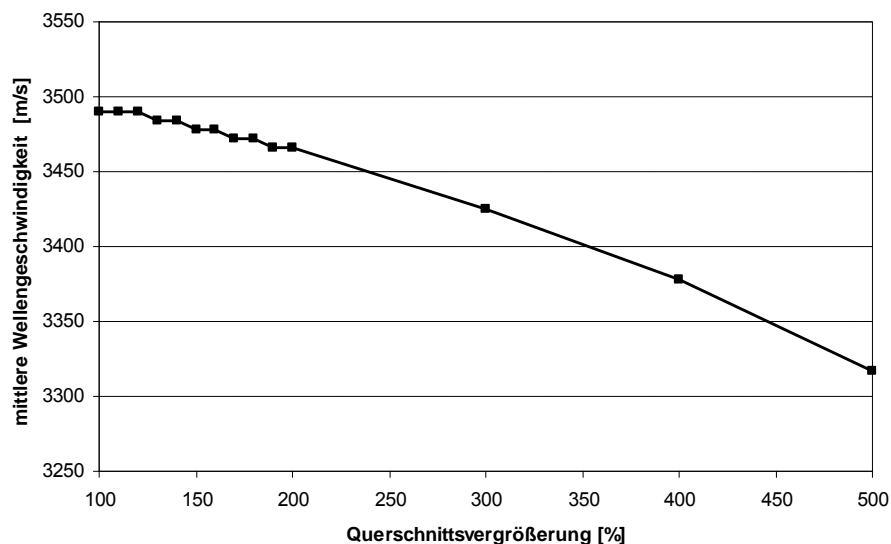


Abb. 5.23: Ermittelte mittlere Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Querschnittsvergrößerung für eine Fehlstellenbreite von 10 cm

Neben einer Querschnittsreduzierung führen auch Querschnittsvergrößerung zu einer Störung der eindimensionalen Dehnwellenausbreitung. Analog zur Querschnittsreduzierung ist die Entwicklung der Wellengeschwindigkeitsreduzierung für eine Querschnittsvergrößerung in Abb. 5.23 abgebildet. Die Abnahme der Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Vergrößerung ist nahezu linear und relativ zur Querschnittsreduzierung gering.

Die lokale Änderung der Gruppenwellengeschwindigkeit infolge einer Geometriefehlstelle ist mit einer komplexen Aufteilung der verschiedenen Wellenanteile der Mischwelle verbunden. Dieser Vorgang ist neben der Fehlstellenbreite und Querschnittsreduzierung bzw. -vergrößerung auch von der Fehlstellenform (vgl. Kap. 5.4.3), der Anzahl vorhandener Fehlstellen sowie von den Materialeigenschaften abhängig. Daher kann eine eindeutige, quantitative Beurteilung einer Wellengeschwindigkeitsreduzierung nicht erfolgen. Qualitativ wird eine Übereinstimmung der gemessenen und simulierten Wellengeschwindigkeitsentwicklung nachgewiesen. Somit kann die Änderung der mittleren Wellengeschwindigkeit als Symptom zur Detektion von Pfahlfehlstellen betrachtet werden. Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die Wellengeschwindigkeitsreduzierung auch bei kleinen Fehlstellen feststellbar ist, bei denen keine Fehlstellenreflexionen im Geschwindigkeitsverlauf interpretierbar sind.

Bei in situ Messungen kann die Geschwindigkeitsreduzierung zum einen durch vergleichenden Messungen an mehreren Pfählen mit bekannter Länge oder zum anderen durch den Einsatz der entwickelten erweiterten Meßkette erfaßt werden. Bei mehreren Meßebenen kann zusätzlich der Fehlstellenbereich über die abschnittsweise Wellengeschwindigkeit lokalisiert werden.

Eine Quantifizierung der Fehlstellengröße kann wie erläutert nicht anhand des Symptoms der Geschwindigkeitsänderung erfolgen, sondern nur bei ausreichend großen Fehlstellen über die Interpretation der Reflexionen im Geschwindigkeitsverlauf.

5.4.2 Quantifizierung der Fehlstellenausbildung

Die mögliche Quantifizierung der Fehlstellenausbildung ist abhängig von der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses im Verhältnis zur Fehlstellengröße. Die Möglichkeiten einer Bestimmung der genauen Fehlstellenausbildung anhand der Fehlstellenreflexionen wird im folgenden anhand der Testpfahlmessungen vorgestellt. Beispielhaft sind in Abb. 5.24 zwei simulierte Geschwindigkeitsverläufe infolge unterschiedlich großer Fehlstellenbreiten, aber gleich großer Querschnittsreduzierungen bzw. Impedanzänderungen bei konstanter Stoßimpulsanregung gezeigt.

Bei der relativ zur Grenzwellenlänge des Stoßimpulses großen Fehlstelle der Länge $l = 2 \text{ m}$ kann die Fehlstellenausbildung mit Hilfe der Laufzeitdifferenzen bestimmt werden. Hingegen kann die kleine Fehlstelle mit $l = 0,1 \text{ m}$ anhand der Fehlstellenreflexion zwar erkannt, die Fehlstellenausbildung aber nicht ermittelt werden.

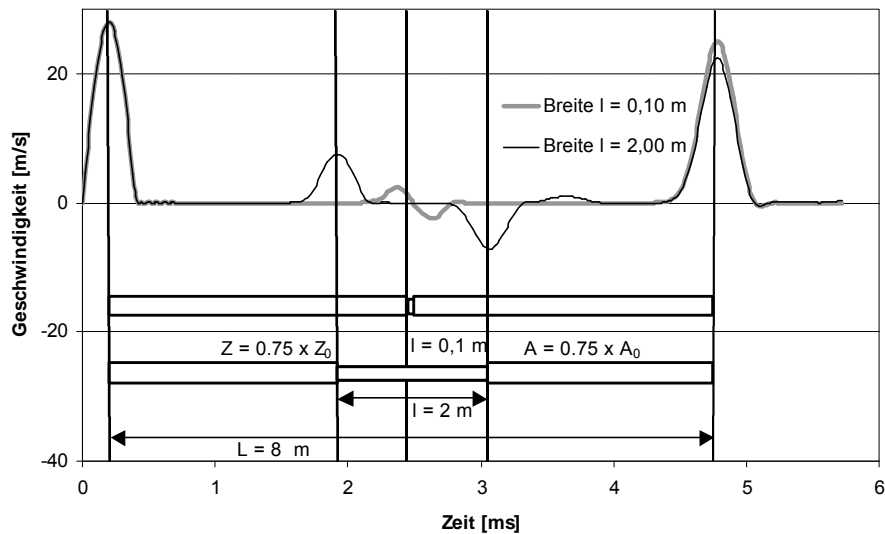


Abb. 5.24: Ermittelte mittlere Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Querschnittsvergrößerung für eine Fehlstellenbreite von 10 cm

Zur Bestimmung der Fehlstellenausbildung werden zunächst die Geometrievariationen mit einer sprunghaftigen Fehlstellenform betrachtet (vgl. Tab. 5.2). Hierbei werden die Genauigkeit der Bestimmung der Fehlstellenlage, d.h. des Abstands zum Fehlstellenanfang unterhalb des Pfahlkopfs, die Fehlstellenbreite entlang des Pfahlschafts sowie die Fehlstellentiefe, d.h. die Größe der Querschnittsreduzierung, untersucht.

5.4.2.1 Vorgehen zur Bestimmung der Fehlstellenausbildung

Mit der in Kap. 5.4.1 ermittelten mittleren Wellengeschwindigkeit kann nach Gleichung (5.1) durch die Laufzeit t_{VR1} zwischen Impulseinleitung und der Reflexion des Fehlstellenanfangs die Fehlstellenlage im Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf bestimmt werden (Abb. 5.25).

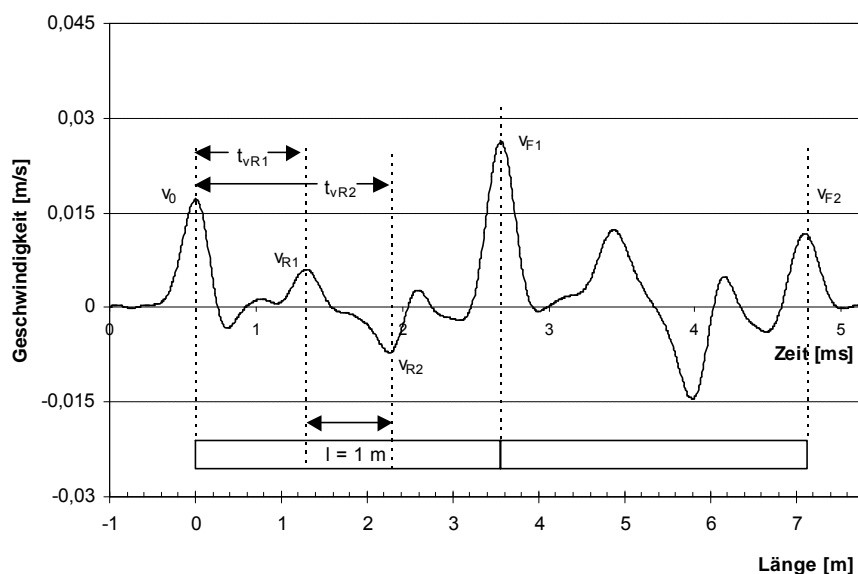


Abb. 5.25: Bestimmung der Fehlstellenausbildung mit dem Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Das Fehlstellenende ergibt sich mit der Laufzeit t_{VR2} . Die Differenz der Laufzeiten t_{VR1} und t_{VR2} ermöglicht die Bestimmung der Fehlstellenbreite. Neben dem Meßsignal des Beschleunigungsaufnehmers am Pfahlkopf können zur Ermittlung der Fehlstellenausbildung auch die Kraftverläufe der DMS-Aufnehmer in den zusätzlichen Meßebenen herangezogen werden (Abb. 5.26). Hierbei können die Meßebenen oberhalb der Fehlstelle (DMS 1) eindeutig interpretiert werden, in den tieferen Ebenen treten bedingt durch die geometrische Lage Reflexionsüberlagerungen auf.

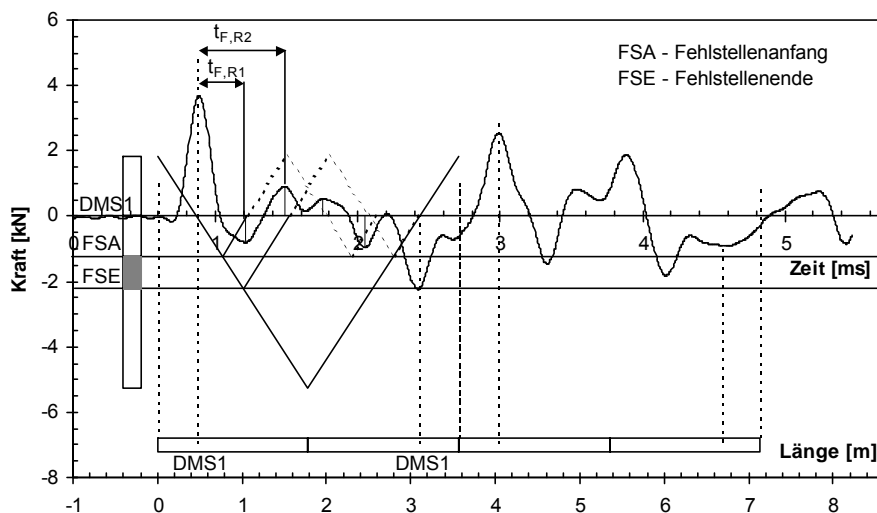


Abb. 5.26: Bestimmung der Fehlstellenausbildung mit dem Kraftverlauf der oberen DMS-Meßebeine (DMS 1)

Die Bestimmung der Fehlstellentiefe erfolgt über die Teilchengeschwindigkeiten v_{R1} und v_{R2} der Fehlstellenreflexionen. Aus der Übergangsbedingung der Teilchengeschwindigkeit bei einem Impedanzwechsel nach Gleichung (3.15) ergibt sich der Reflexionsfaktor nach Gleichung (3.16). Mit dem Reflexionsfaktor wird die Beziehung zwischen den Impedanzen nach Gleichung (3.19) definiert. Führt man die Impedanzänderung auf eine Änderung der Querschnittsfläche zurück, kann mit Hilfe der Gleichung (3.12) eine Querschnittsreduzierung berechnet werden. Dieses gilt für eine Wellenausbreitung ohne Dämpfungseinfluß. Um diesen Einfluß zu berücksichtigen, wird nach Gleichung (3.24) der Dämpfungsparameter D und daraus resultierend der Korrekturfaktor k mit Hilfe der Gleichung (3.25) ermittelt. Durch Multiplikation der Teilchengeschwindigkeiten v_{R1} und v_{R2} mit dem Korrekturfaktor k kann anschließend mit dem erläuterten Vorgehen die Fehlstellentiefe bestimmt werden.

5.4.2.2 Ergebnisse der Fehlstellenbestimmung

Für die Fehlstellenbestimmung werden zunächst die Messungen mit einer Stoßwellen-anregung durch Impulshammer 1 (vgl. Kap. 4.1.2) mit und ohne Bodeneinfluß betrachtet. Die ermittelte bzw. die vorhandene Fehlstellenlage aus dem Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite ist für Pfahl 1 mit einer Querschnitts-

reduzierung auf 60 % in Abb. 5.27 dargestellt. Auf der Abszisse ist die Fehlstellenbreite der betrachteten Geometrievariationen (vgl. Tab. 5.2) und auf der Ordinate die vorhandene sowie die aus der Messung ermittelte Fehlstellenlage aufgetragen.

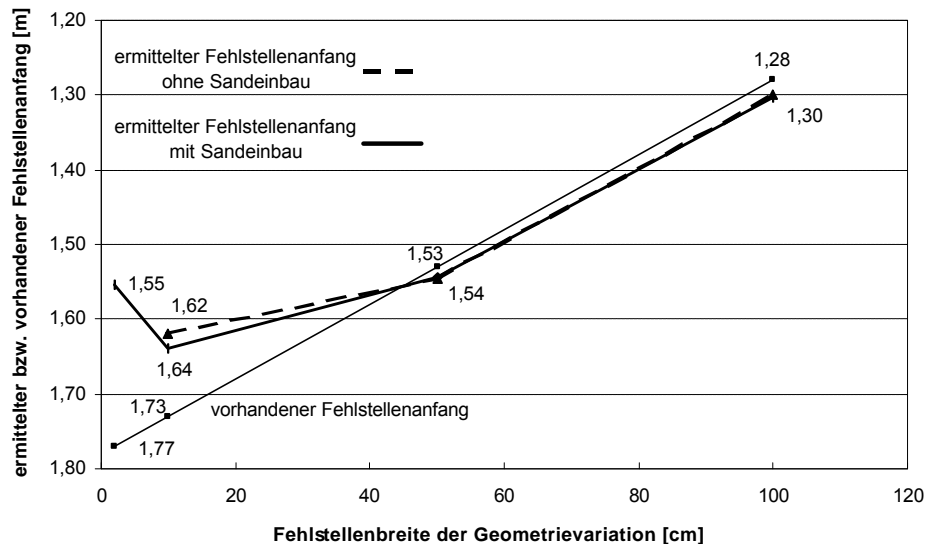


Abb. 5.27: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellenlage in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite mit und ohne Bodeneinfluß an Pfahl 1

Bei relativ zur Grenzwellenlänge des Stoßimpulses großen Fehlstellen wird eine gute Übereinstimmung mit der vorhandenen Fehlstellenlage erzielt. Unterhalb einer Fehlstellengröße von 50 cm treten große Abweichungen auf. Dieses Verhalten ergibt sich ebenfalls für die Auswertung der Messung an Pfahl 3 mit einer Querschnittsreduzierung.

Die Auswertung der Fehlstellenbreite und -tiefe ist analog zur Fehlstellenlage in den Abb. 5.28 und Abb. 5.29 gezeigt. Die Fehlstellenbreite, ab der die ermittelte Größe von der vorhandenen signifikant abweicht, beträgt ca. 50 cm.

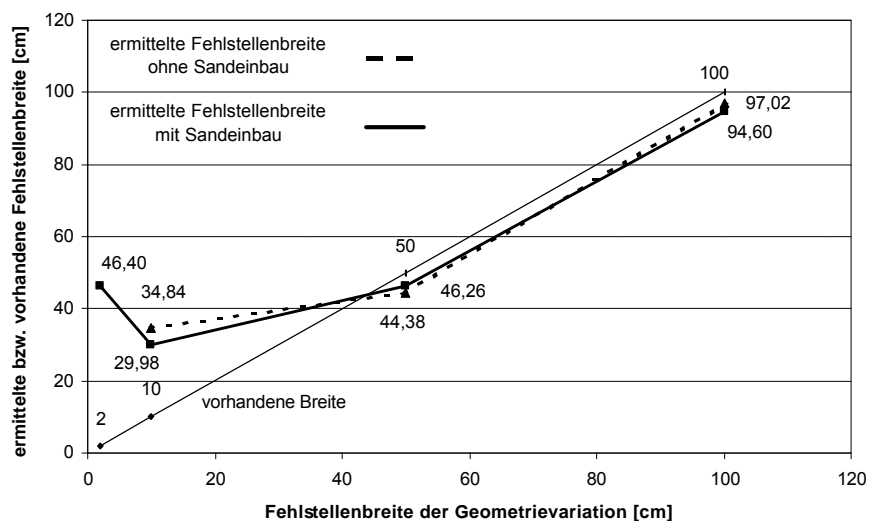


Abb. 5.28: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellenbreite in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite mit und ohne Bodeneinfluß an Pfahl 1

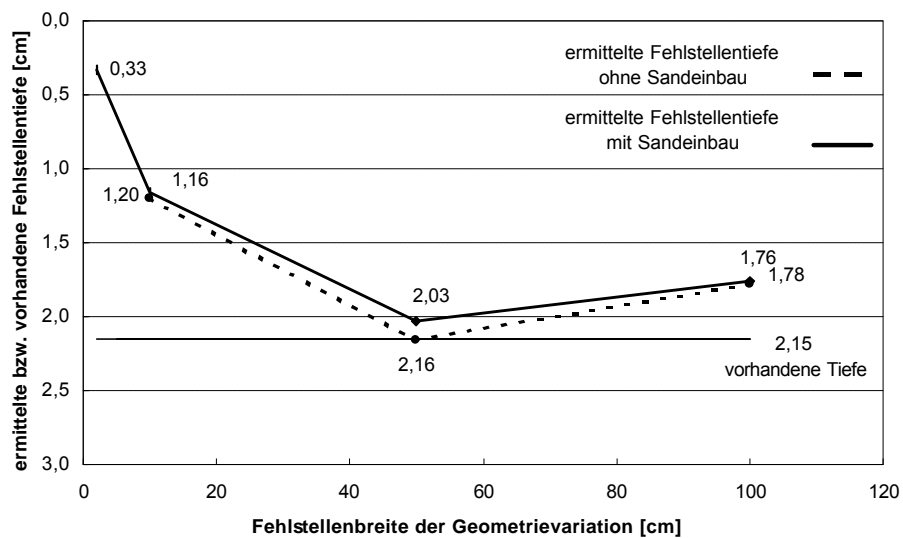


Abb. 5.29: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellentiefe in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite mit und ohne Bodeneinfluß an Pfahl 1

Als Beispiel für die Auswertung der DMS-Aufnehmer in der Meßebebene oberhalb der Fehlstelle ist in Abb. 5.30 die ermittelte Fehlstellenbreite aus Geschwindigkeits- und Kraftverläufen gegenübergestellt. Es zeigt sich eine vergleichbare Genauigkeit der bestimmten Größen und somit die generelle Auswertbarkeit der gemessenen Kraftverläufe bezüglich der Fehlstellenbestimmung.

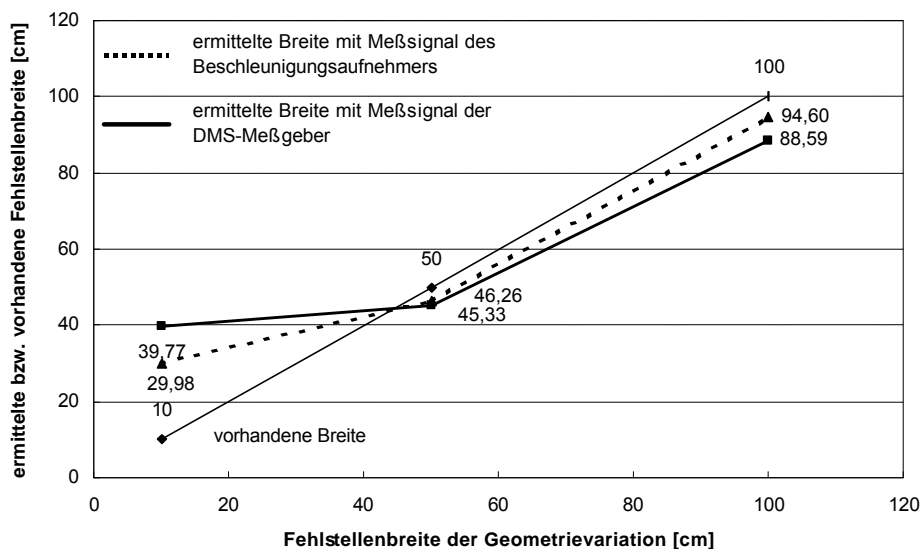


Abb. 5.30: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellenbreite in Abhängigkeit der Fehlstellenbreite durch Auswertung der Geschwindigkeits- und Kraftverläufe

Da die kleinste bestimmbare Fehlstellenbreite von der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses abhängig ist, erfolgt die Untersuchung mit Stoßimpulsanregungen unterschiedlicher Grenzwellenlängen. Neben der bisher betrachteten Stoßanregung mit Impulshammer 1 (Impulseinleitung B) wird eine hochfrequente Anregung mit einer Stahlkugel, deren

Durchmesser 10 mm beträgt (Impulseinleitung A) sowie die Anregung mit Impulshammer 2 (Impulseinleitung C) mit einer größeren Stoßdauer verwendet (vgl. Tab. 4.2). Die aus Kap. 4 resultierende durchschnittliche Stoßdauer und die daraus nach Gleichung (3.26) sowie (3.27) berechnete Grenzwellenlänge unter der Annahme einer mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von $c = 3500 \text{ m/s}$ ist für die drei Impulseinleitungen in Tab. 5.4 gegeben.

Tab. 5.4: Übersicht der betrachteten Stoßimpulsanregungen

Impulseinleitung	Stoßdauer [ms]	Grenzwellenlänge [m]
A	0,1	0,35
B	0,5	1,75
C	1,0	3,5

In den Abb. 5.31 bis 5.33 ist beispielhaft für jede betrachtete Impulseinleitung ein Geschwindigkeitsverlauf dargestellt. Bei hochfrequenter Anregung mit Impulseinleitung A kommt es übereinstimmend mit der Begrenzung der minimalen Stoßdauer nach Gleichung (4.3) zu Überlagerungen mit horizontalen Querschwingungen, die eine eindeutige Lokalisierung von Fehlstellenreflexionen erschweren. Erst bei großen Reflexionen relativ zu den auftretenden Querschwingungen kann eine Fehlstellenbestimmung erfolgen.

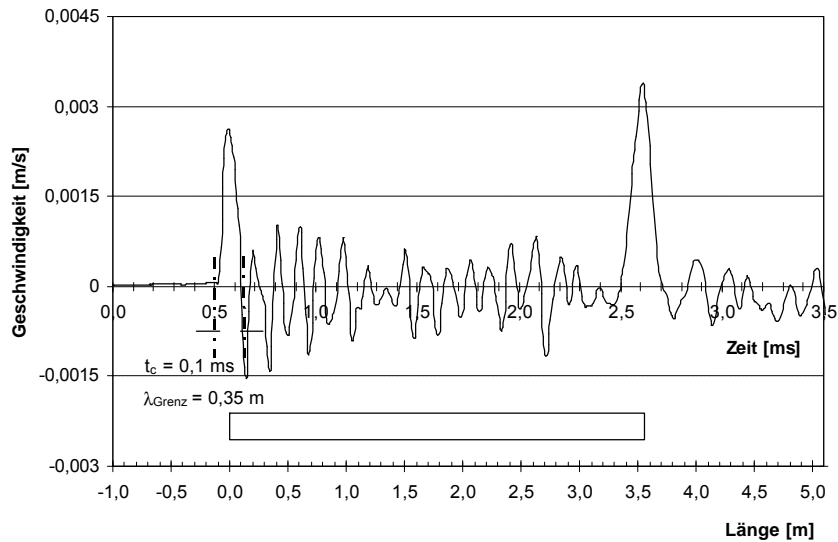


Abb. 5.31: Geschwindigkeitsverlauf infolge Stoßanregung mit Impulseinleitung A

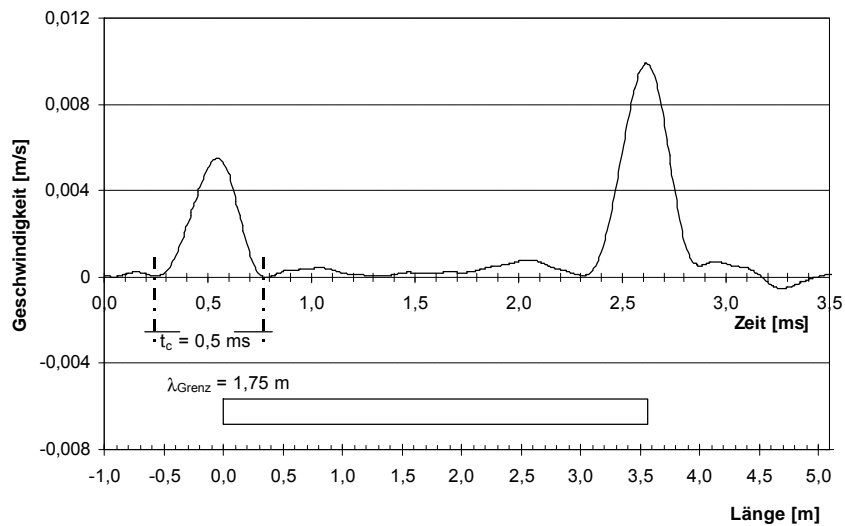


Abb. 5.32: Geschwindigkeitsverlauf infolge Stoßanregung mit Impulseinleitung B

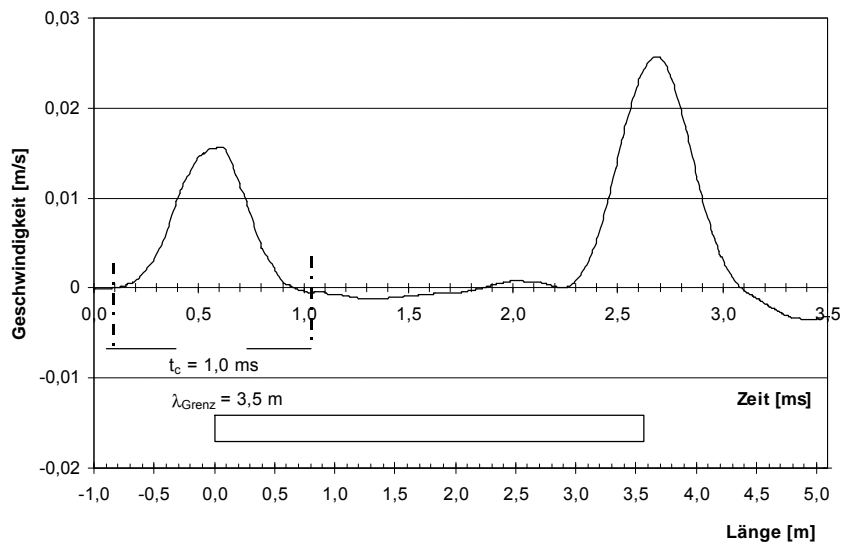


Abb. 5.33: Geschwindigkeitsverlauf infolge Stoßanregung mit Impulseinleitung C

Repräsentativ für die Ergebnisse der Fehlstellenbestimmung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Impulseinleitungen ist in Abb. 5.34 der Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellenbreite abgebildet.

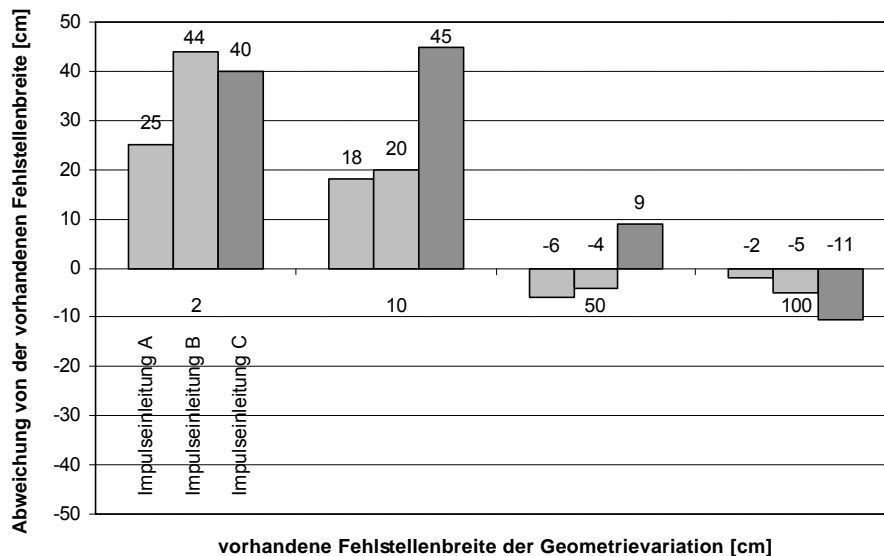


Abb. 5.34: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellenbreite in Abhängigkeit der unterschiedlichen Impulseinleitungen

In Abhängigkeit der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses zeigt sich eine unterschiedliche Genauigkeit der ermittelten Fehlstellenbreite. Desto kleiner die Grenzwellenlänge ist, um so kleinere Fehlstellengrößen können bestimmt werden. Hierbei wird allerdings die minimal mögliche Grenzwellenlänge bzw. Stoßdauer nach Gleichung (4.3) begrenzt.

5.4.2.3 Simulationsberechnungen zur Bestimmung der Fehlstellenausbildung

Um das Verhältnis zwischen Grenzwellenlänge und kleinster bestimmbarer Fehlstellengröße genauer zu bestimmen, erfolgen Simulationsberechnungen.

Die Entstehung der Reflexionen infolge einer Fehlstelle werden durch die Betrachtung einer eindimensionalen Dehnwellenausbreitung erfaßt. Da es sich somit nicht um einen mehrdimensionalen Effekt wie bei der in Kap. 5.4.1 untersuchten Wellengeschwindigkeitsänderung handelt, werden die Berechnungen vereinfacht mit dem im Kap. 3.3 erläuterten eindimensionalen Modell durchgeführt.

Zur Erzielung einer ausreichenden Genauigkeit bei der Bestimmung der Fehlstellengröße sind für die Wahl der Elementgröße nach Gleichung (3.38) analog zu den Berechnungen in Kap. 5.4.1 mindestens 80 – 100 Elemente pro Grenzwellenlänge erforderlich.

Die Simulation des Stoßimpulses erfolgt zum einen mit einer Stoßdauer von $t_c = 0,4$ ms bzw. mit einer Grenzwellenlänge $\lambda_{\text{Grenz}} = 1,4$ m und zum anderen mit einer Stoßdauer von $t_c = 0,8$ ms bzw. mit einer Grenzwellenlänge $\lambda_{\text{Grenz}} = 2,8$ m bei einer Wellengeschwindigkeit von $c = 3500$ m/s.

Mit Hilfe einer Parameterstudie wird bei den Berechnungen die Fehlstellenbreite schrittweise verringert, um die kleinste bestimmbare Fehlstellenbreite zu erfassen. Ein Vergleich der mit der Simulation ermittelten Fehlstellenbreite sowie –tiefe ist in den Abb. 5.35 und Abb. 5.36 dargestellt. Sowohl für die Fehlstellenbreite als auch für deren Tiefe beträgt bei einer Grenzwellenlänge des Stoßimpulses von $\lambda_{\text{Grenz1}} = 1,4 \text{ m}$ die kleinste bestimmbare Fehlstellenbreite $B_F = 35 \text{ cm} = \lambda_{\text{Grenz1}} / 4$. Bei einer Grenzwellenlänge von $\lambda_{\text{Grenz2}} = 2,8 \text{ m}$ beträgt diese Breite $B_F = 70 \text{ cm} = \lambda_{\text{Grenz2}} / 4$.

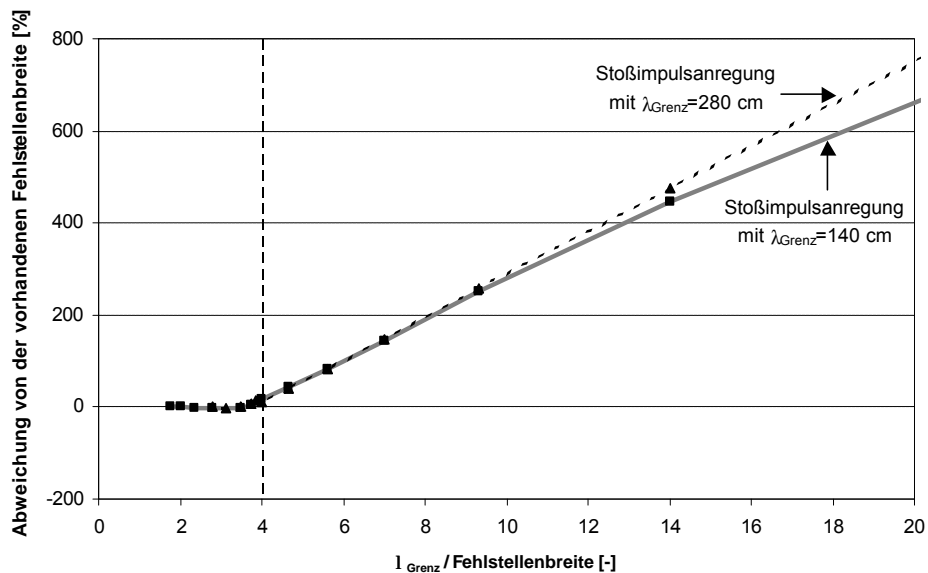


Abb. 5.35: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellenbreite in Abhängigkeit der unterschiedlichen Stoßimpulsdauer

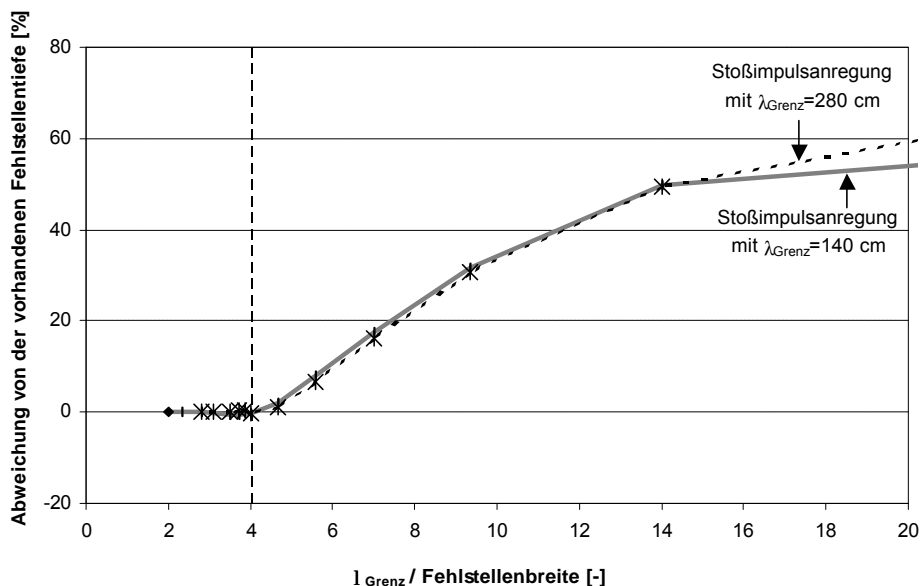


Abb. 5.36: Vergleich der ermittelten und vorhandenen Fehlstellentiefe in Abhängigkeit der unterschiedlichen Stoßimpulsdauer

Aus diesen Ergebnissen ist ein Zusammenhang von Grenzwellenlänge und kleinster bestimmbarer Fehlstellengröße abzuleiten. Ist die Fehlstellenbreite B_F kleiner als die halbe Grenzwellenlänge λ_{Grenz} , kommt es zu einer Überlagerung der Reflexionen am Fehlstellenanfang und -ende (Abb. 5.37). Diese führt ab einer bestimmten Fehlstellenbreite dazu, daß sich die Lage der Reflexionspeaks und der resultierende Betrag der Teilchengeschwindigkeit verändern. Hierdurch kommt es zu einer Fehlinterpretation der Fehlstellengröße.

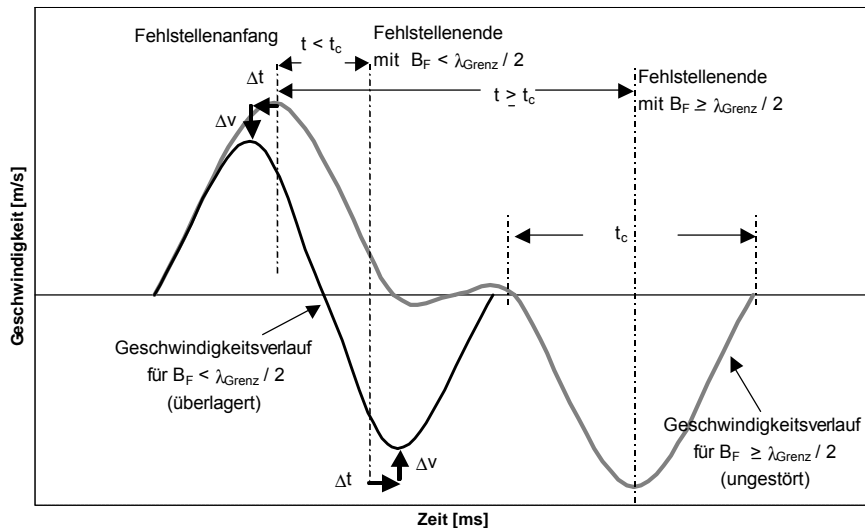


Abb. 5.37: Reflexionsüberlagerungen infolge der Fehlstellenbreite in Abhängigkeit der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses

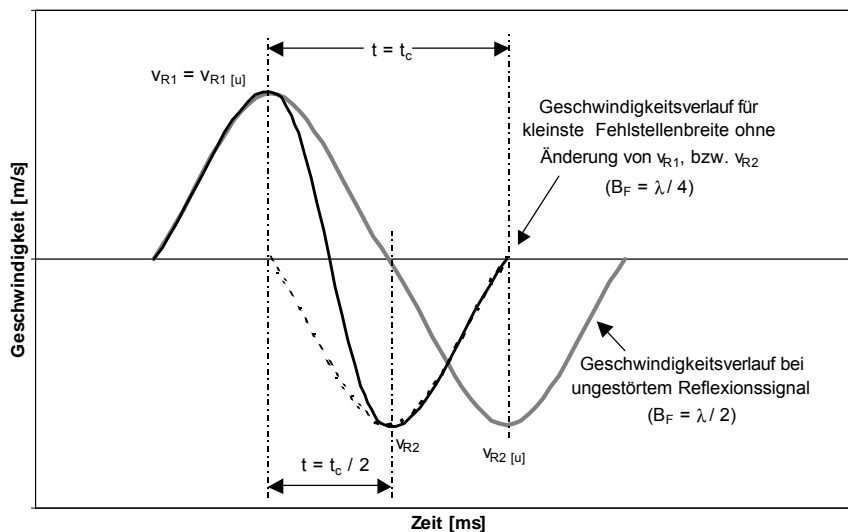


Abb. 5.38: Kleinste bestimmbare Fehlstellenbreite in Abhängigkeit der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses

Bis zu einer Fehlstellenbreite B_F , die einem Viertel der Grenzwellenlänge λ_{Grenz} entspricht, treten zwar Reflexionsüberlagerungen auf, aber die Lage der Reflexionspeaks wird nicht beeinflusst (Abb. 5.38). Dies entspricht den Ergebnissen der Simulationsberechnungen (Tab. 5.5).

Tab. 5.5: Übersicht der ermittelten kleinsten Fehlstellenbreiten in Abhängigkeit der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses

Kleinste bestimmbare Fehlstellenbreite $B_{\text{Fmin}} = \lambda_{\text{Grenz}} / 4 \text{ [m]}$	Stoßdauer [ms]
0,35	0,4
0,70	0,8

Dieser Zusammenhang wird ebenfalls durch die Meßergebnisse bestätigt. Aufgrund der eingeschränkten Anzahl der betrachteten Fehlstellenbreiten wird bei den Messungen die genaue Größe der kleinsten bestimmbaren Fehlstellenbreite nicht erfaßt.

Die Untersuchungen zeigen, daß für eine Fehlstellenbreite kleiner $\lambda_{\text{Grenz}} / 4$ die Breite zwar nicht bestimmt werden kann, aber die Fehlstelle durch die Reflexion erkannt wird. Für diesen Fall ergibt die Auswertung der überlagerten Reflexionen eine zu große Fehlstellenbreite, da sich die Laufzeit zwischen den Reflexionspeaks um Δt vergrößert (vgl. Abb. 5.37). Gleichzeitig wird durch die Überlagerung der Betrag der Teilchengeschwindigkeit um Δv verringert, so daß eine kleinere Fehlstellentiefe gegenüber der vorhandenen Tiefe interpretiert wird. Ab einer Fehlstellenbreite von ca. $\lambda_{\text{Grenz}} / 40$ ist das Verhältnis zur Grenzwellenlänge so ungünstig, daß die Fehlstelle wie bei den Geometrievariationen 1 - 9 anhand des Reflexionssignals nicht mehr erkannt wird. Dieses wird in Abb. 5.39 durch die simulierten Geschwindigkeitsverläufe infolge der Stoßanregung mit unterschiedlichen Impulslängen bei konstanter Fehlstellenbreite verdeutlicht.

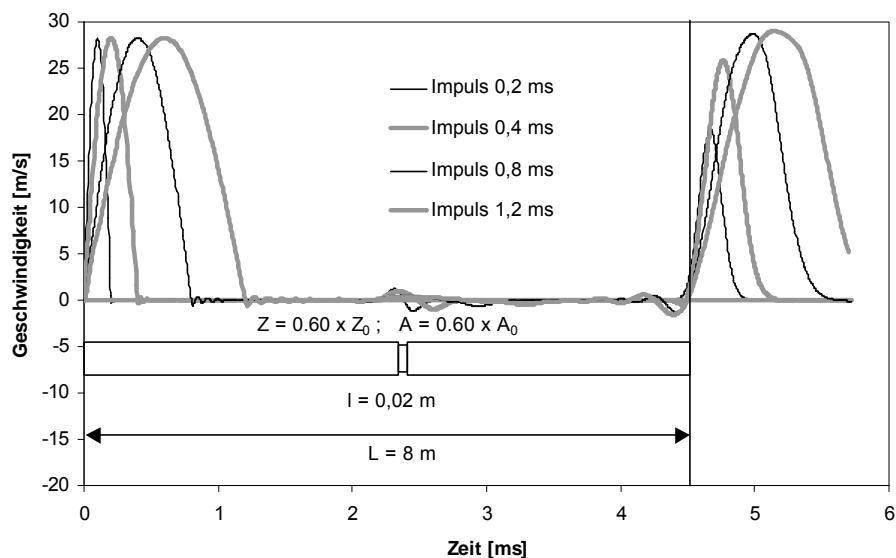


Abb. 5.39: Simulierte Geschwindigkeitsverläufe infolge der Stoßanregung mit unterschiedlichen Impulslängen bei konstanter Fehlstellenbreite

5.4.3 Untersuchung weiterer Fehlstellentypen

Bei den Untersuchungen zur Erfassung von Pfahlfehlstellen wird in den vorangegangenen Kapiteln eine sprungartige, symmetrische Querschnittsverminderung als Fehlstellenform betrachtet. Neben dieser Form werden bei den Testpfahlmessungen auch allmähliche und unsymmetrische Querschnittsverminderungen vorgegeben (vgl. Tab. 5.2). Weiterhin wird nicht nur eine geänderte Form, sondern auch der Einfluß mehrerer Fehlstellen untersucht. Zur Fehlstellenbestimmung werden die Änderung der mittleren Wellengeschwindigkeit und die Interpretation des Reflexionsspektrums herangezogen.

5.4.3.1 Allmähliche Querschnittsverminderungen

Allmähliche Querschnittsverminderungen werden mit den Testpfahlmessungen bei den Geometrievariationen 12, 15 und 21 von Pfahl 1 sowie für die Variationen 11, 15 und 22 von Pfahl 3 betrachtet (vgl. Tab. 5.2). Aus den Erkenntnissen von Kap. 5.4.1 und Kap. 5.4.2 kann geschlossen werden, daß zum einem die Wellengeschwindigkeitsänderungen aufgrund der Reflexionsüberlagerungen an den breiten Fehlstellen von Variation 21 sowie 22 und zum anderen die Fehlstellenreflexionen für Fehlstellenbreiten kleiner $\lambda_{\text{Grenz}}/4$ der Variationen 11, 12, 15 sowie 16 nicht interpretiert werden können.

Zunächst wird die Bestimmung der Fehlstellengröße anhand der Fehlstellenreflexionen für die Geometrievariationen 21 und 22 vorgestellt. Die gesamte Fehlstelle erstreckt sich über eine Breite von $L_G = 100$ cm. In dem mittleren Bereich der Fehlstelle ist die Querschnittsreduzierung auf einer Breite von $L_M = 50$ cm konstant. Die allmähliche Reduzierung ist in einem Übergangsbereich mit einer Breite von $L_U = 25$ cm vorgegeben (vgl. Abb. 5.2). Der Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf für Variation 22 ist in Abb. 5.40 dargestellt.

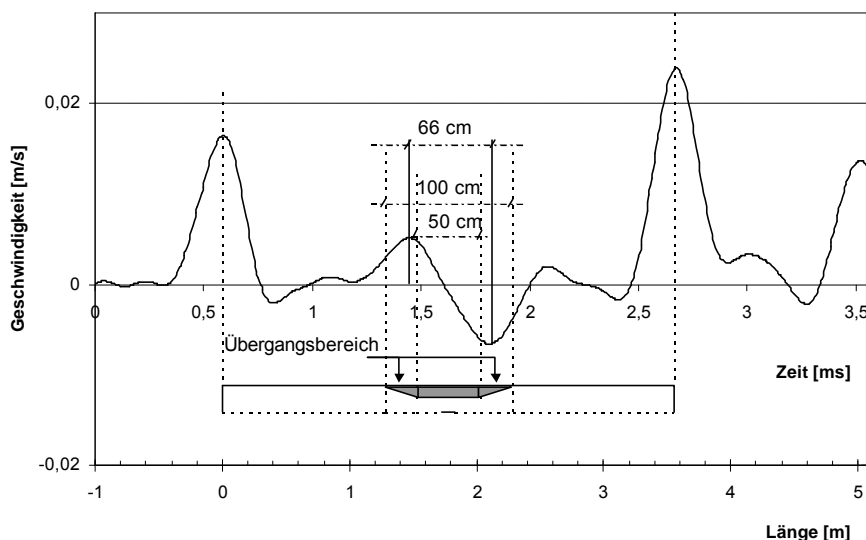


Abb. 5.40: Bestimmung der Fehlstellengröße für die allmähliche Querschnittsverminderung der Geometrievariation 22

Die Ausbildung der Fehlstellenreflexionen ermöglicht hierbei keine Differenzierung der Fehlstellenform. Eine Beurteilung, ob eine allmähliche oder eine sprungartige Querschnittsreduzierung vorliegt, ist nicht möglich. Der aus den Reflexionen ermittelte Fehlstellenanfang und die ermittelte Fehlstellenbreite sind in Abb. 5.41 im Vergleich zu den Werten der sprungartigen Fehlstelle mit einer Breite von 50 und 100 cm angegeben. Bei der allmählichen Fehlstelle wird in Abhängigkeit der Breite des Übergangsbereiches $L_{\bar{U}}$ eine kleinere Fehlstellenbreite L_{all} erkannt. Diese ergibt sich aus der Breite des mittleren Bereiches L_M und aus einem Drittel der Breite des Übergangsbereiches $L_{\bar{U}}$ zu:

$$L_{all} = L_M + 2 \frac{1}{3} L_{\bar{U}} = 50 + 2 \frac{1}{3} 25 = 66 \text{ cm} . \quad (5.2)$$

Dieser Ansatz stimmt mit dem ermittelten Fehlstellenanfang A_{all} und dem vorhandenen Anfang des mittleren Bereiches A_M überein:

$$A_{all} = A_M + \frac{1}{3} L_{\bar{U}} = 1,53 - \frac{1}{3} 0,25 = 1,45 \text{ m} . \quad (5.3)$$

Für die Auswertung der Fehlstellentiefe ergibt sich die Größe der Querschnittsreduzierung im mittleren Bereich mit einer gleichen Genauigkeit wie bei der sprungartigen Fehlstellenform.

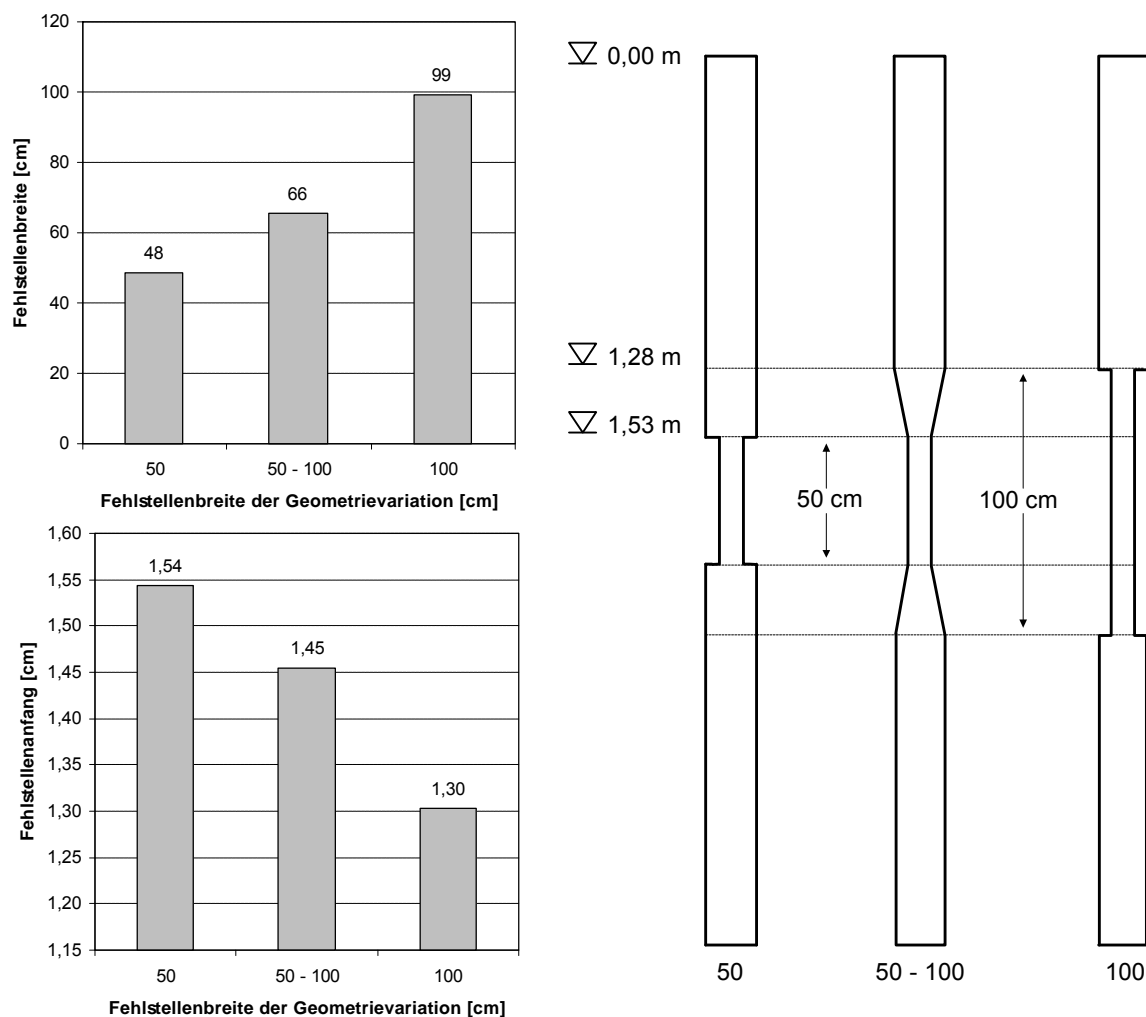


Abb. 5.41: Bestimmung der Fehlstellengröße für die allmähliche Querschnittsverminderung der Geometrievariation 22

Für die kleineren Fehlstellenausdehnungen der Geometrievariationen 11, 12, 15, und 16, bei denen keine Reflexionsüberlagerungen des Pfahlfußreflexes auftreten, werden die Wellengeschwindigkeitsänderungen untersucht. Ein Vergleich der ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderung bei allmählichen und sprungartigen Querschnittsreduzierungen ist in Tab. 5.6 gezeigt. Als Referenz für die Wellengeschwindigkeitsreduzierung dient die mittlere Wellengeschwindigkeit des unversehrten Pfahls (vgl. Tab 5.3).

Tab. 5.6: Vergleich der ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderung bei allmählichen und sprungartigen Querschnittsreduzierungen

Allmähliche Querschnittsänderung		sprungartige Querschnittsänderung	
Variationen Pfahl 1	Geschwindigkeits- änderung [m/s]	Variationen Pfahl 1	Geschwindigkeits- änderung [m/s]
12	-74	13	-96
16	-75	19	-102
Variationen Pfahl 3	Geschwindigkeits- änderung [m/s]	Variationen Pfahl 3	Geschwindigkeits- änderung [m/s]
11	-93	14	-120
15	-74	20	-102

Im Vergleich zu den sprungartigen Querschnittsänderungen stellt sich bei dem allmählichen Übergang eine geringere Wellengeschwindigkeitsänderung ein. Die Beeinflussung der Dehnwelle tritt im Übergangsbereich allmählich auf. Somit ist die resultierende Gruppengeschwindigkeitsreduzierung geringer als bei sprungartigen Geometriewechseln.

Für die Variationen mit allmählicher Querschnittsverringerung ist die größte Reduzierung der Wellengeschwindigkeit bei der Variation 11 festzustellen, bei der die maximale Steigung im Übergangsbereich vorliegt (vgl. Tab. 5.2).

Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeitsentwicklung von der Steigung im Übergangsbereich werden Simulationsberechnungen durchgeführt. Hierzu wird das in Kap. 5.4.1.3 vorgestellte rotationssymmetrische Modell verwendet. Neben den in Abb. 5.21 betrachteten sprungartigen Fehlstellen werden allmähliche Querschnittsreduzierungen mit einer Steigung im Übergangsbereich von 1:2 und 1:5 berechnet. Der mittlere Bereich der Fehlstelle hat eine Breite von 10 cm bei einer Querschnittsverminderung auf 50 %. Die aus den Simulationsberechnungen ermittelten mittleren Wellengeschwindigkeiten sind in Abb. 5.42 dargestellt.

Die Simulationen bestätigen die bei der Messung gewonnenen Ergebnisse. Übereinstimmend mit den Messungen unterscheiden sich die Wellengeschwindigkeitsänderungen bei den verschiedenen Steigungen erst ab einer Querschnittsreduzierung auf 50 % (vgl. Tab. 5.6). Eine Quantifizierung der Wellengeschwindigkeitsänderung kann aufgrund der in Kap. 5.4.1.3 erläuterten Zusammenhänge nicht erfolgen.

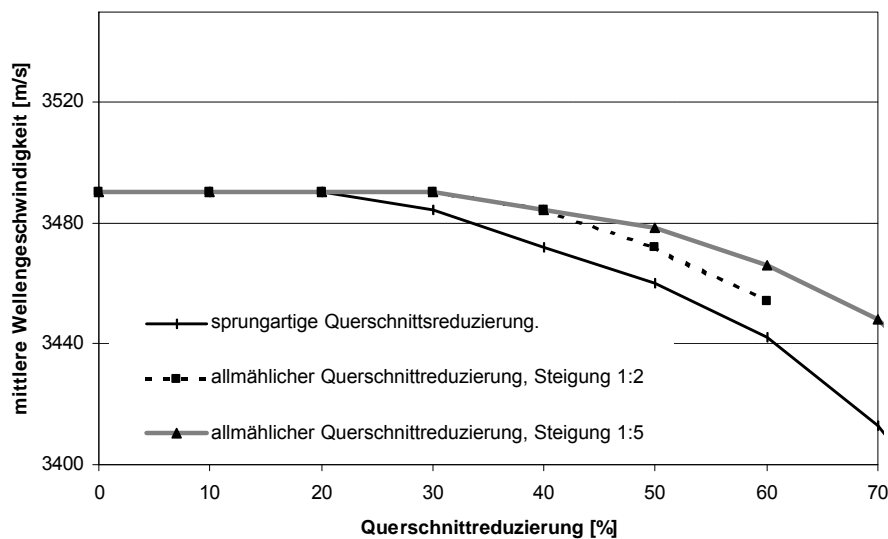


Abb. 5.42: Vergleich der mittleren Wellengeschwindigkeiten bei sprungartigen und allmählichen Querschnittsreduzierungen unterschiedlicher Steigung

5.4.3.2 Unsymmetrische Fehlstellen

Bei den bisher betrachteten Fehlstellen handelt es sich um zur Pfahlachse symmetrische Fehlstellenformen. Der Einfluß einer Unsymmetrie wird bei den Testpfahlmessungen mit der Geometrievariation 6 untersucht (vgl. Tab. 5.2). Hierbei handelt es sich um eine halbseitige Fehlstelle mit einer Breite von 2 cm und einer Querschnittsreduzierung auf 75 % an Pfahl 3. Die symmetrische Variation 5 weist die gleiche Breite und Querschnittsreduzierung auf und dient daher zum Vergleich der resultierenden Fehlstellenreflexionen sowie der Wellengeschwindigkeitsänderungen.

Für die Variationen 5 und 6 ergeben sich für die mittleren Wellengeschwindigkeiten gleiche Größenordnungen. Somit kann der Einfluß der Unsymmetrie nicht differenziert werden. Aufgrund der geringen Breite der Fehlstelle kann die Fehlstellengröße für beide Fehlstellen nicht anhand der Fehlstellenreflexionen bestimmt werden.

Zur weiterführenden Untersuchung des Einflusses der Unsymmetrie bei größeren Fehlstellenbreiten werden Simulationsberechnungen durchgeführt. Dieser mehrdimensionale Einfluß kann nicht durch ein rotationssymmetrisches Modell abgebildet werden, es ist eine dreidimensionale Modellierung erforderlich. Die Wahl der Elementgröße und des Zeitschritts erfolgt analog zu dem in Kap. 5.4.1.3 erläuterten rotationssymmetrischen Modell. Die Fehlstellenbreite wird bei den Berechnungen in einem Bereich von 2 bis 100 cm mit einer konstanten Querschnittsreduzierung auf 50 % für den symmetrischen und unsymmetrischen Fall variiert. Sowohl für die Wellengeschwindigkeitsänderungen als auch für die Auswertung der Fehlstellenreflexionen ergeben sich für sämtliche Berechnungen keine signifikanten Unterschiede.

5.4.3.3 Fehlstellenanzahl

Der Einfluß mehrerer Fehlstellen kann mit Hilfe der Testpfahlmessungen aufgrund der begrenzten Pfahllänge nur bedingt untersucht werden. Im Anschluß an die Geometrievariation 15 mit einer allmählichen Querschnittsverringering über eine Breite von 50 cm wird bei Variation 17 oberhalb des allmählichen Übergangsbereich eine zusätzliche 2 cm breite sprungartige Fehlstelle vorgegeben. Für die Variation 18 wird unterhalb des allmählichen Übergangsbereichs eine weitere derartige Fehlstelle ausgeführt (vgl. Abb. 5.3).

Die Auswertung der mittleren Wellengeschwindigkeit ergibt für die Variation 17 und 18 keine signifikanten Änderungen gegenüber Variation 15 mit nur einer Fehlstelle. Dieses kann zum einen durch die Überlagerung der Fehlstellenreflexionen untereinander aufgrund des geringen Fehlstellenabstands und zum anderen durch deren Überlagerung mit der Fußreflexion begründet werden. Infolge der Überlagerung der Fehlstellenreflexionen untereinander kann eine Differenzierung der Fehlstellenanzahl im Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf nicht erfolgen (Abb. 5.43).

Resultierend aus den in Kap. 5.4.2 gewonnenen Erkenntnissen kann eine Unterscheidung der einzelnen Fehlstellen erst erfolgen, wenn der Abstand zwischen den einzelnen Querschnittsänderungen mindestens $\lambda_{\text{Grenz}} / 4$ beträgt. Für diesen Fall kann die Fehlstellenbreite und -tiefe bestimmt werden. Sind eine oder mehrere Fehlstellen entlang der oberen Hälfte der Pfahlachse vorhanden, treten die Fehlstellenreflexionen mehrfach auf, bevor die Pfahlfußreflexion den Pfahlkopf erreicht. Dieses kann die Beurteilung mehrerer Fehlstellen stark beeinträchtigen, auch wenn ein ausreichender Abstand zwischen den Querschnittsänderungen existiert.

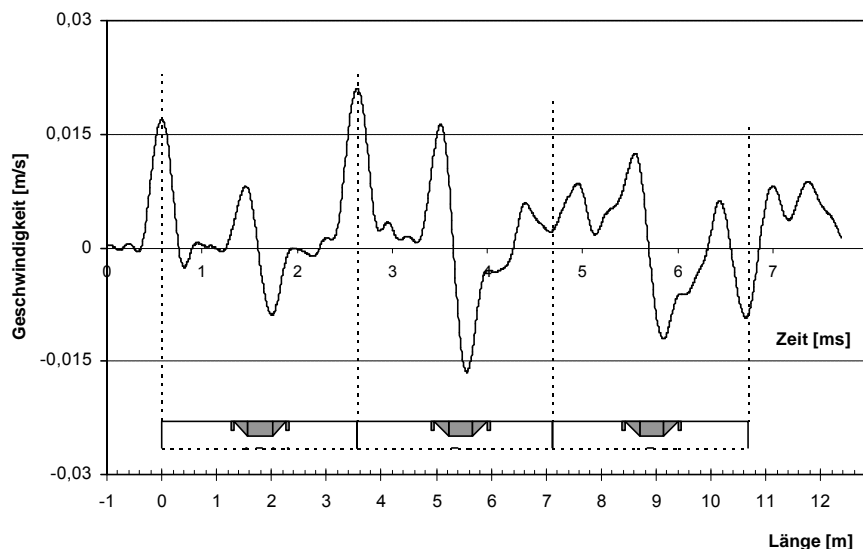


Abb. 5.43: Gemessener Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf für Geometrievariation 18 an Pfahl 3

Zur Untersuchung der qualitativen Abhängigkeit der Wellengeschwindigkeitsentwicklung von der Anzahl der Fehlstellen werden Simulationsberechnungen mit dem in Kap. 5.4.1.3 vorgestellten rotationssymmetrischen Modell durchgeführt. Neben dem unversehrten Zustand wird die mittlere Wellengeschwindigkeit bei zunächst einer und anschließend zwei Fehlstellen in der unteren Pfahlhälfte mit einer Breite von 10 cm bei einer Querschnittsreduzierung auf 50 % bestimmt (Abb. 5.44).

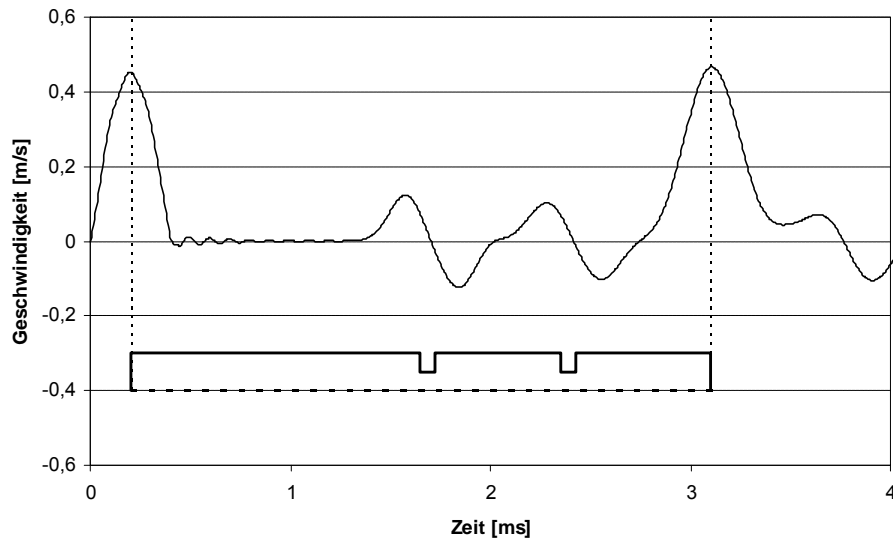


Abb. 5.44: Simulierter Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf infolge von zwei Fehlstellen mit einer Breite von 10 cm bei einer Querschnittsreduzierung auf 50 %

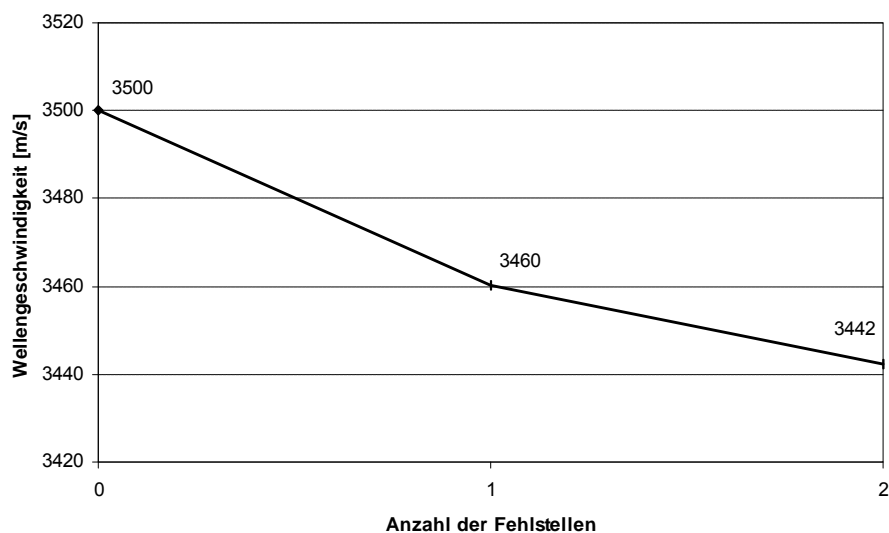


Abb. 5.45: Ermittelte Entwicklung der mittleren Wellengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Anzahl der Fehlstellen

Die ermittelte Wellengeschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit der Anzahl der Fehlstellen ist in Abb. 5.45 abgebildet. Es zeigt sich eine zunehmende Wellengeschwindigkeitsreduzierung bei zunehmender Anzahl von Fehlstellen. Dieses kann durch die mehrfache, lokale Beeinflussung der Dehnwellenausbreitung und infolge dessen der mehrfachen Beeinflussung der mittleren Gruppengeschwindigkeit begründet werden.

Als Sonderfall einer großen Anzahl von Fehlstellen können Haarrisse entlang der Pfahlachse betrachtet werden. Aufgrund der sehr geringen Größe können die Fehlstellenreflexionen nicht interpretiert werden, aber es kommt zu einer erheblichen Reduzierung der mittleren Wellengeschwindigkeit.

Bei den Testpfahlmessungen werden durch eine Biegeüberbeanspruchung Haarrisse am Pfahl 2 erzeugt (Abb.5.46). Die entstandenen Risse sind dabei unregelmäßig im mittleren Bereich der Pfahlachse verteilt. Die Auswertung der mittleren Wellengeschwindigkeit ergibt eine Reduzierung von $c = 3441 \text{ m/s}$ bei der Referenzmessung am unversehrten Pfahl auf $c = 3207 \text{ m/s}$ bei der Messung mit vorhandenen Haarrissen. Die Reduzierung um 234 m/s ist somit ca. doppelt so groß wie die maximale Änderung der Geschwindigkeit bei einer Querschnittsverringering auf 50% (vgl. Tab. 5.3).

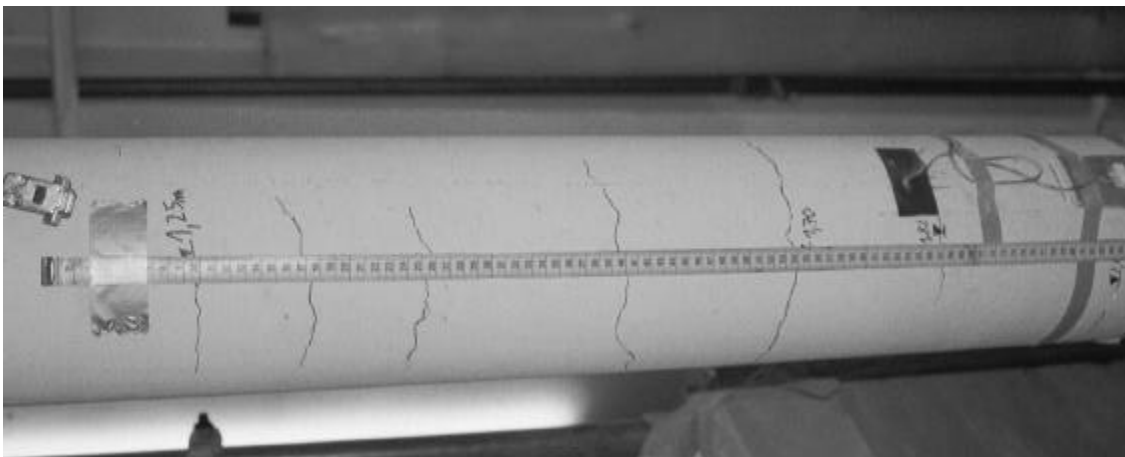


Abb. 5.46: Haarrisse mit mittleren Bereich des Schaftes von Pfahl 2

Im Gegensatz zu den Haarrissen ist der Abriß des Pfahlschafts als weiterer Sonderfall bei ebenfalls minimaler Rißbreite eindeutig am Reflexionsverlauf zu erkennen. Bei einem Abriß tritt nahezu eine vollständige Reflexion auf, so daß eine Wellenausbreitung unterhalb des Risses nicht stattfindet.

5.4.4 Zusammenfassung der Untersuchungen zur Fehlstellenauflösung

Die Untersuchungen zeigen, daß die Reduzierung der mittleren Wellengeschwindigkeit als Symptom der Fehlstellendetektion herangezogen werden kann. Der Betrag der Reduzierung ist im wesentlichen abhängig von der Größe der Querschnittsreduzierung. Zusätzlich wird die Reduzierung durch die Fehlstellenform, die Anzahl der Fehlstellen und durch die Materialeigenschaften beeinflusst. Daher ist einerseits eine eindeutige, quantitative

Interpretation des Betrages der Reduzierung nicht möglich. Andererseits ist die Wellengeschwindigkeitsänderung bereits für kleine Fehlstellenausdehnungen erfaßbar, bei denen keine Fehlstellenreflexionen mehr interpretierbar sind.

Mit Hilfe der Untersuchungsergebnisse können die Grenzen einer möglichen Bestimmung der Fehlstellenausbildung anhand der Fehlstellenreflexionen aufgezeigt werden. Diese Grenzen werden durch die Grenzwellenlänge λ_{Grenz} des Stoßimpulses bestimmt. Die minimale Stoßdauer kann nach Gleichung (4.3) in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers begrenzt werden, damit die Ausbildung einer Dehnwelle gewährleistet ist und keine Querschwingungen auftreten. Die maximale Stoßdauer wird nach Gleichung (4.4) durch die Pfahlänge eingeschränkt, so daß keine Überlagerung der Impulseinleitung mit der Pfahlfußreflexion entsteht. Aus dieser minimalen und maximalen Begrenzung der Stoßdauer ergibt sich für die Grenzwellenlänge λ_{Grenz} in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers d und der Pfahlänge L :

$$2d \leq \lambda_{\text{Grenz}} \leq 2L \quad (5.4)$$

Ab einer Fehlstellenbreite B_{FS} von ca. $\lambda_{\text{Grenz}} / 40$ ist eine Lokalisierung anhand der Fehlstellenreflexion möglich. Aufgrund der Überlagerungen dieser Reflexion kann die Fehlstellengröße erst ab einer Breite von $\lambda_{\text{Grenz}} / 4$ bestimmt werden. Bei Fehlstellenbreiten größer $\lambda_{\text{Grenz}} / 2$ treten keine Überlagerungen der Reflexionen einer Fehlstelle auf. Bestimmt werden können die Fehlstellenbreite und die Größe der Querschnittsreduzierung. Eine Differenzierung der Fehlstellenform kann nicht erfolgen. Symmetrische und unsymmetrische Fehlstellenausbildungen können nicht unterschieden werden, und bei allmählichen Querschnittsreduzierungen wird in Abhängigkeit des Übergangsbereiches eine mittlere Fehlstellenbreite interpretiert. In Tab. 5.7 ist ein Überblick der möglichen Fehlstellendetektion anhand der Auswertung von Wellengeschwindigkeitsänderungen und Fehlstellenreflexionen gegeben.

Tab. 5.7: Überblick der möglichen Fehlstellendetektion anhand der Auswertung von Wellengeschwindigkeitsänderungen und Fehlstellenreflexionen

Fehlstellenbreite	Symptom zur Fehlstellendetektion	
	Wellengeschwindigkeitsänderung	Fehlstellenreflexionen
$0 < B_{\text{FS}} < \lambda/40$	qualitative Beurteilung möglich	keine Reflexionen interpretierbar
$\lambda/40 \leq B_{\text{FS}} < \lambda/4$	qualitative Beurteilung möglich	qualitative Lokalisierung der Fehlstelle möglich
$\lambda/4 \leq B_{\text{FS}}$	Beurteilung kann durch Reflexionsüberlagerungen in Abhängigkeit der Pfahlgeometrie erschwert werden	quantitative Bestimmung der Fehlstellengröße möglich

6 Untersuchung des Bodeneinflusses auf das Meßsignal

In den bisher durchgeführten Untersuchungen wird der Einfluß von Geometrie- und Materialeigenschaften des Pfahls auf die Stoßwellenausbreitung vorgestellt. Neben diesen beiden Eigenschaften kann die Interaktion des Pfahls mit dem umgebenden Boden wesentlichen Einfluß auf die Wellenausbreitung im Pfahl haben. Bei dieser Interaktion ist zwischen der statischen und der dynamischen Wirkung des Bodens zu unterscheiden. Wie in Kap. 3.1 erläutert, kann die statische, verschiebungsabhängige Wirkung bei der Wellenausbreitung im betrachteten Fall der „low-strain“ Prüfmethode vernachlässigt werden. Hingegen ist die dynamische, geschwindigkeitsabhängige Wirkung des Bodens, also die Dämpfung, entscheidend für die Stoßwellenausbreitung im Pfahl.

Die Grundlagen der auftretenden Dämpfungsvorgänge sind in Kap. 3.1 beschrieben. Neben der Bodendämpfung tritt außerdem eine Materialdämpfung im Pfahl auf. Beide Dämpfungseinflüsse können vereinfacht mit der Differentialgleichung (3.11) beschrieben werden.

Für die meßtechnische Erfassung der vorhandenen Dämpfungsvorgänge sind zwei Auswirkungen auf den resultierenden Geschwindigkeitsverlauf zu unterscheiden.

Dieses ist zum einen die gleichmäßige Verringerung der Teilchengeschwindigkeit über den gesamten Geschwindigkeitsverlauf. Dabei liegt ein näherungsweise konstanter oder linearer Einfluß durch Pfahlmaterial- sowie Bodendämpfung entlang des Pfahlmantels vor.

Zum anderen können bei ungleichmäßiger, stark schwankender Größe der Bodendämpfung zusätzliche lokale Verringerungen oder Vergrößerungen der Teilchengeschwindigkeit auftreten. Dieses ist für die Beurteilung der Pfahlintegrität von großer Bedeutung, damit es nicht zu Fehlinterpretationen kommt.

Um eine Zuordnung der Ursachen von Geschwindigkeitsschwankungen zu ermöglichen, sind für die Interpretation des Meßsignals zusätzliche Informationen aus einer Baugrund-erkundung, z.B. Bodenprofile und Sondierungsergebnisse, erforderlich. Mit Hilfe dieser Informationen besteht die Möglichkeit, charakteristische Bodeneinflüsse auf das Meßsignal, z.B. bei Schichtwechseln, vorhandenen Reflexionen zuzuordnen. Wenn ein nahezu gleichförmiger Bodenaufbau für ein Baufeld vorliegt, treten solche Charakteristika meist bei der Messung von mehreren Pfählen in ähnlicher Art auf.

Bei einer visuellen Standardauswertung des Meßsignals ist eine derartige Zuordnung jedoch nur qualitativ möglich. Für eine genauere Betrachtung ist eine rechnerische Auswertung erforderlich. Hierzu werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Untersuchungen durchgeführt, wie aus den Baugrundinformationen eine Dämpfungsverteilung gewählt und diese bei einer rechnerischen Auswertung berücksichtigt werden kann.

Eine rechnerische Auswertung erfolgt hierbei durch Simulationsberechnungen mit dem in Kap. 3.3 beschriebenen Berechnungsmodell. Das vereinfachte, eindimensionale Modell bildet die wesentlichen Effekte zur Simulation des Bodeneinflusses ab.

Das Berechnungsmodell berücksichtigt den statischen und dynamischen Bodeneinfluß durch

die Kopplung des Dehnstabmodells mit Feder- und Dämpferelementen (vgl. Kap. 3.3). Der maßgebliche dynamische Einfluß wird durch die Dämpferelemente berücksichtigt.

Bei den Berechnungen wird zur Simulation der Dämpfungsvorgänge die Pfahlmaterialdämpfung nach Gleichung (3.34) näherungsweise konstant über die Pfahllänge angenommen. Die Bodendämpfung wird am Pfahlmantel und –fuß durch die diskreten Dämpferelemente differenziert berücksichtigt. Um einen Dämpfungsverlauf vorzugeben, werden die Dämpferelemente entlang der Pfahlachse in eine beliebige, angepaßte Anzahl von Segmenten eingeteilt. Für die einzelnen Segmente wird eine abschnittsweise konstante oder lineare Dämpfungsgröße verwendet.

Der Bodeneinfluß wird für ausgewählte Fallbeispiele untersucht, bei denen von einer unversehrten Pfahlgeometrie ausgegangen werden kann. Aus den vorhandenen Daten der Baugrunderkundung wird eine Dämpfungsverteilung ermittelt und zur Simulation der Stoßwellenausbreitung verwendet. Durch Variation der Dämpfungsparameter erfolgt eine Anpassung des berechneten an den gemessenen Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf.

Generell kann festgestellt werden, daß der Einfluß des Bodens auf die Wellenausbreitung im Pfahl bislang nur in wenigen Untersuchungen berücksichtigt wurde. In [82] werden im Rahmen von Modellmessungen an Kunststoffpfählen die Geschwindigkeitsverläufe von Messungen ohne und mit Bodeneinfluß qualitativ gegenübergestellt. Bei bindigen Böden treten hierbei sehr viel größere Dämpfungen als bei nichtbindigen Böden auf. Aufgrund des Modellmaßstabes können keine quantitativen Aussagen über den Bodeneinfluß abgeleitet werden. Eine qualitative Gegenüberstellung von Baugrundinformationen und deren Auswirkungen auf das Meßsignal ist in [2] zu finden.

Bei den in Kap. 2.3 erläuterten Auswertungsprogrammen TNOWAVE und PITWAP können bei der Rückrechnung des Meßsignals konstante oder lineare Dämpfungsverläufe über die gesamte Pfahllänge berücksichtigt werden, die aber nur eine bedingte, nicht ausreichende Differenzierung ermöglichen [29]. Untersuchungen mit diesen Programmen, die zeigen, wie sich die Bodendämpfung auf das Meßsignal auswirkt, werden in [93] und [82] vorgestellt. Eine eindeutige Zuordnung von Bodeneigenschaften und Dämpfungswerten wird jedoch nicht ermöglicht.

6.1 Einfluß der Dämpfungsverteilung auf die Wellenausbreitung

Anhand von Simulationsberechnungen wird im folgenden gezeigt, wie sich repräsentative Ansätze der Dämpfungsverteilung für das verwendete Berechnungsmodell auf den Geschwindigkeitsverlauf auswirken. Für die unterschiedlichen Dämpfungsverteilungen werden charakteristische Auswirkungen auf den Geschwindigkeitsverlauf bestimmt. Anhand dieser Charakteristika lassen sich Schlußfolgerungen ziehen, welche Ursachen signifikante Schwankungen der Geschwindigkeitsverläufe bei in situ Messungen haben.

Wie bereits erläutert, hat neben dem Boden auch das Pfahlmaterial Anteil an der Gesamtdämpfung. Der Einfluß der Pfahlmaterialdämpfung (Materialdämpfung des Dehnstabs, PD, vgl. Abb. 3.9 b) auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf wird in Abb. 6.1 deutlich. Mit zunehmender Materialdämpfung verringert sich die Teilchengeschwindigkeitsamplitude der Pfahlfußreflexion bei gleichzeitiger Zunahme der Reflexionsbreite. Der vorhandene Dämpfungsanteil des Pfahlmaterials ist jedoch meist so klein, daß nur geringe Verbreiterungen der Pfahlfußreflexion bei in situ Messungen festzustellen sind.

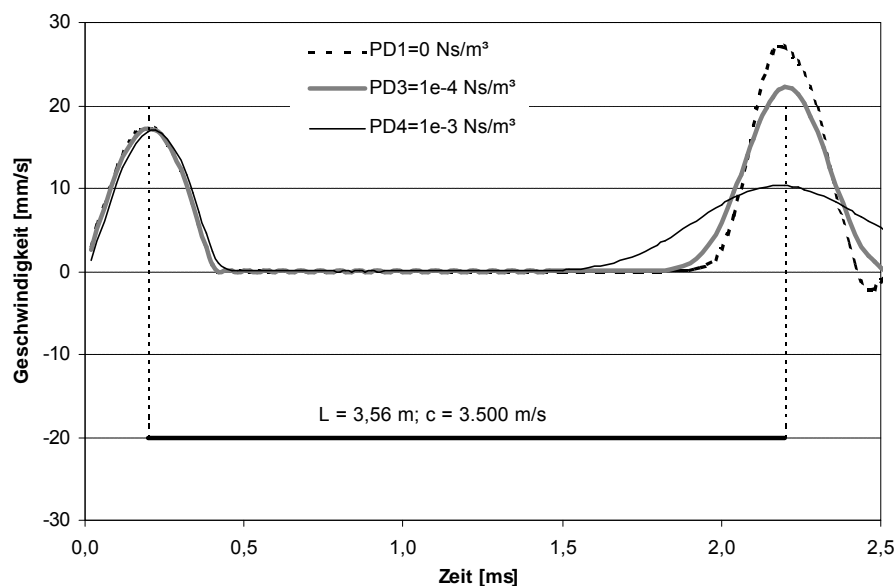


Abb. 6.1: Einfluß der Pfahlmaterialdämpfung auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Die Variation der Dämpfung am Pfahlfuß (diskreter Dämpfer am Pfahlfuß, FD, vgl. Abb. 3.9 b) bewirkt eine Veränderung der Geschwindigkeitsamplitude der Pfahlfußreflexion, sie führt im Vergleich zur Pfahlmaterialdämpfung aber nicht zu einer Verbreiterung der Reflexion. Der Geschwindigkeitsverlauf für FD 1 in Abb. 6.2 zeigt eine deutliche Zugwellenreflexion. Mit zunehmender Dämpfung nimmt die reflektierte Geschwindigkeit ab, und es entsteht bei entsprechend großer Dämpfung FD 3 eine Druckwellenreflexion (vgl. Kap. 3.1). Im Übergangsbereich geht ein großer Teil der Energie in den Dämpfer über. Analog kann dieser Effekt der Zug- und Druckwellenreflexion über die Steifigkeit einer Feder am Pfahlfuß realisiert werden.

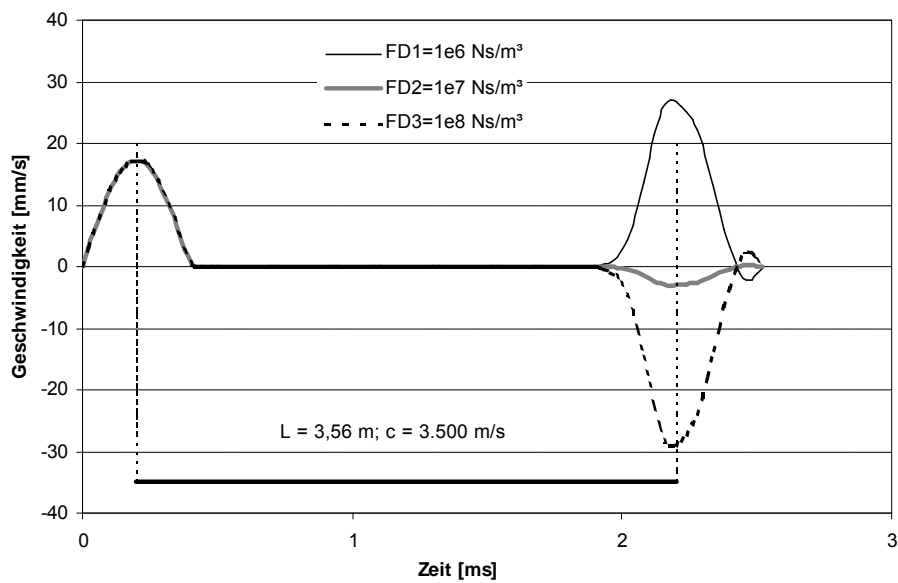


Abb. 6.2: Einfluß der Dämpfung am Pfahlfuß auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Für die folgenden Simulationen verschiedener Bodendämpfungsverläufe entlang des Pfahlmantels wird eine konstante Pfahlmaterialdämpfung von $PD = 10^{-4} \text{ Ns/m}^3$ angenommen. Zunächst wird der Einfluß auf den Geschwindigkeitsverlauf eines über die gesamte Pfahllänge konstanten und eines linearen Dämpfungsverlaufs (diskrete Dämpfer, BD, vgl. Abb. 3.9 b) in Abb. 6.3 gegenübergestellt.

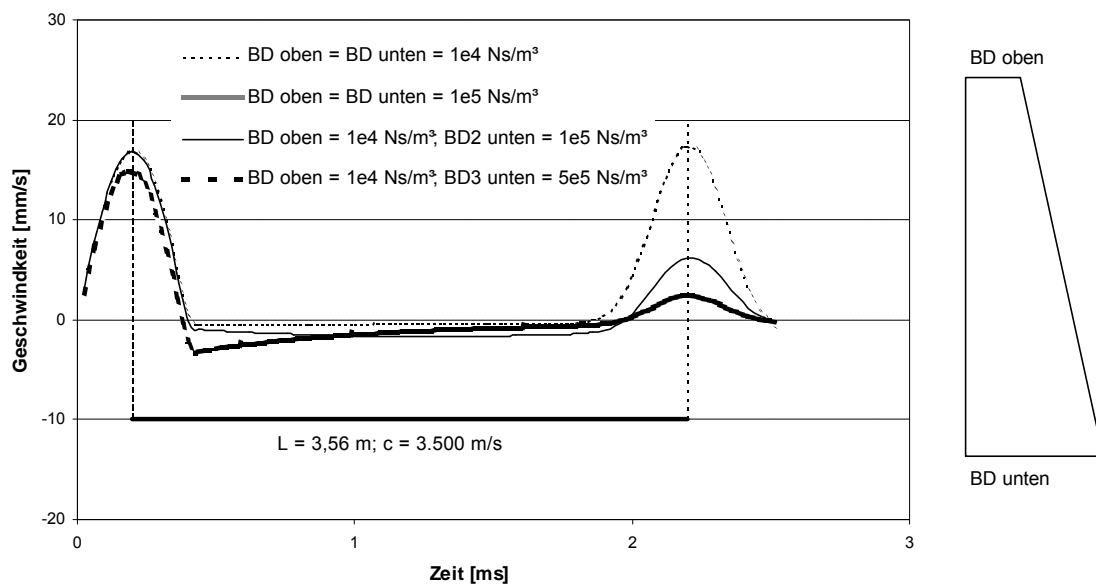


Abb. 6.3: Einfluß einer konstanten und linearen Dämpfungsverteilung auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Die Zunahme der Bodendämpfung bewirkt schon im Bereich des Pfahlkopfes bzw. des Einleitungsimpulses eine Abnahme der Geschwindigkeitsamplitude bis in den negativen Bereich. Je größer die Dämpfung ist, um so größer ist das absolute Minimum und um so kleiner ist die Amplitude der Fußreflexion. Im Verlauf zwischen diesem Minimum und der Pfahlfußreflexion nähert sich die Teilchengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Steigung des Dämpfungsverlaufes der Nullachse. Für bestimmte Dämpfungsgrößen bei linearem und konstantem Verlauf zeigt sich ein gleicher Einfluß auf den Geschwindigkeitsverlauf. Generell kann festgestellt werden, daß eine signifikante Bodendämpfung eine Auslenkung des Geschwindigkeitsverlaufs am Pfahlkopf in den negativen Bereich verursacht.

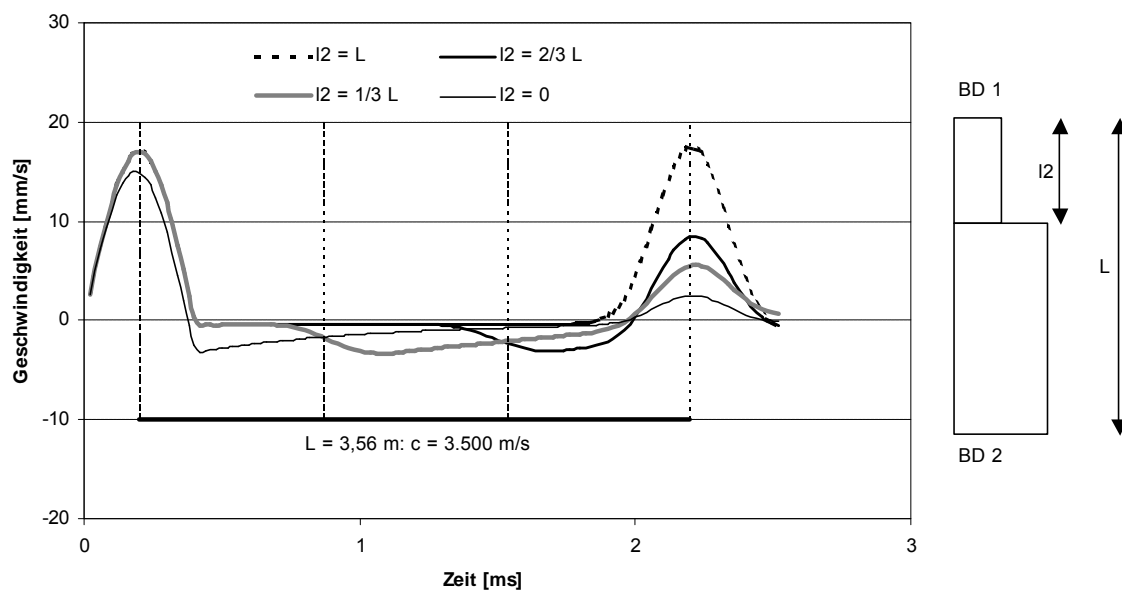


Abb. 6.4: Einfluß eines Sprungs der Dämpfungsgröße auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Repräsentativ für eine einfache Form des Schichtwechsels im Boden werden die Auswirkungen eines Sprungs im Dämpfungsverlauf auf den Geschwindigkeitsverlauf untersucht (Abb. 6.4). Bei den Simulationen wird der Schichtwechsel durch den Sprung der Dämpfungsgröße $BD\ 1 = 10^4\ \text{Ns/m}^3$ auf $BD\ 2 = 10^5\ \text{Ns/m}^3$ betrachtet. Die Lage der Schichtwechsel wird im mittleren Drittel der Pfahllänge vorgegeben. Mit Beginn der steiferen Schicht bildet sich bei allen Verläufen ein lokales Minimum aus, welches sich bei gleicher Amplitude in Form und Lage unterscheidet. Je tiefer der Schichtwechsel liegt, um so später erfolgt die Ausbildung des Minimums und um so runder ist der Verlauf.

Zur Untersuchung eines Schichtwechsels im mittleren Pfahlbereich wird ein Dämpfungsverlauf betrachtet, bei dem eine konstante Bodendämpfung BD im oberen und unteren Drittel angenommen wird. Die Dämpfung BDM im mittleren Drittel wird variiert. Die Lage des Schichtwechsels ist in Abb. 6.5 eindeutig erkennbar. Für $BD < BDM$ bildet sich ein lokales Minimum im mittleren Bereich aus.

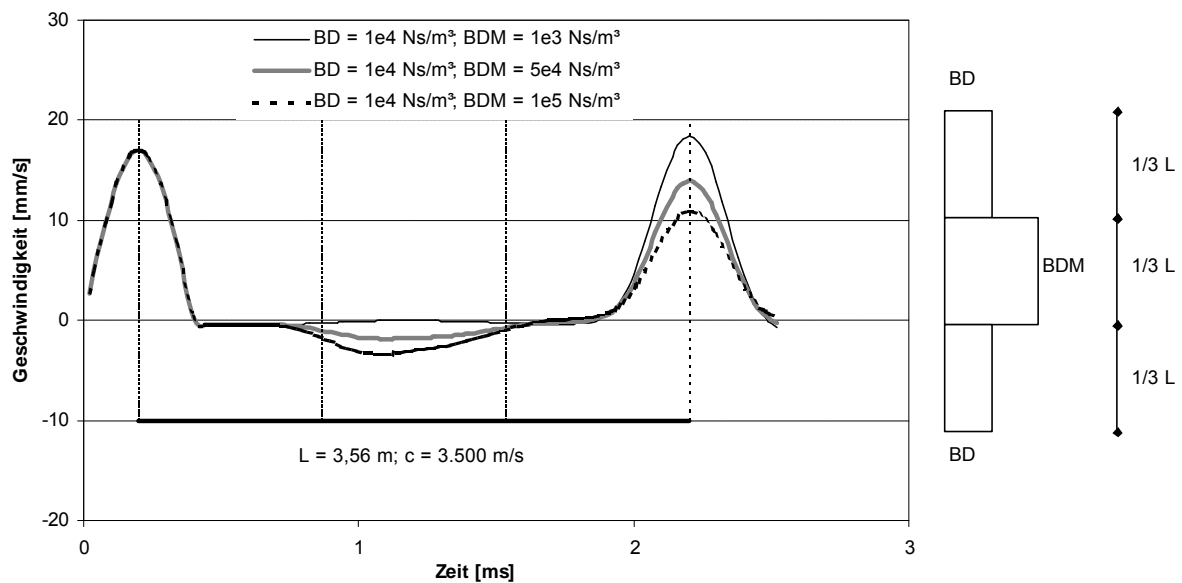


Abb. 6.5: Einfluß einer veränderten Dämpfungsgröße im mittleren Pfahlbereich auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Eine entgegengesetzte Krümmung bzw. ein lokales Maximum entsteht für $BD > BDM$. Krümmungswechsel deuten somit auf Schichtwechsel hin. Die Richtung der Krümmung zeigt an, ob es sich um eine Zu- oder Abnahme der Dämpfung handelt.

Der Einfluß häufiger Schichtwechsel wird anhand eines Dämpfungsverlaufs mit den alternierenden Dämpfungsgrößen BD 1a und BD 1b bzw. BD 2a und BD 2b untersucht (Abb. 6.6).

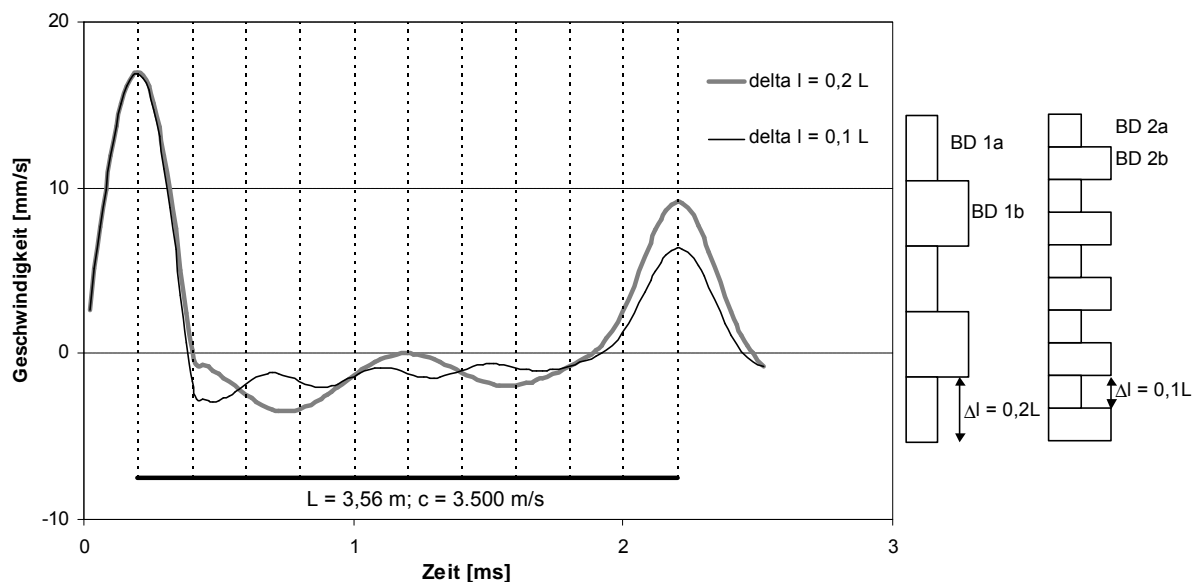


Abb. 6.6: Einfluß einer alternierenden Dämpfungsverteilung auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Die Schichtdicken werden mit $\Delta l = 1/5 \cdot L$ bzw. $\Delta l = 1/10 \cdot L$ gewählt. Die wechselnden Schichten können im Geschwindigkeitsverlauf identifiziert werden. Obwohl die Größe der Dämpfungssprünge gleich ist, entstehen für $\Delta l = 1/5 \cdot L$ stärker ausgeprägte lokale Minima und Maxima.

6.2 Untersuchung des Dämpfungsverhaltens anhand von Messungen

Der Einfluß der Bodendämpfung auf den Geschwindigkeitsverlauf wird anhand verschiedener Messungen im Labor und in situ analysiert, von denen drei repräsentative Fallbeispiele vorgestellt werden [85].

Bei den Untersuchungen werden zunächst die Informationen über die Pfahlgeometrie und den Baugrund ausgewertet. Gleichzeitig werden die Meßsignale eines Pfahls oder mehrerer Pfähle bei gleichen Baugrundverhältnissen hinsichtlich ihrer Eindeutigkeit verglichen. Mit Hilfe der in Kap. 6.1 gewonnenen Charakteristika können Rückschlüsse auf den Bodeneinfluß gezogen werden. Anhand der ausgewerteten Baugrunddaten bzw. durch eine Zuordnung der Bodenschichten wird dann ein Dämpfungsverlauf für die Simulationsberechnung angenommen. Im Anschluß an die Berechnung werden der simulierte und gemessene Geschwindigkeitsverlauf überlagert. Durch eine schrittweise Änderung des Dämpfungsverlaufes bei weiteren Simulationen wird eine Anpassung der berechneten und gemessenen Verläufe erzielt.

6.2.1 Testpfahlmessungen

Als erstes Fallbeispiel werden die in Kap. 5 beschriebenen Testpfahlmessungen (Tab. 6.1) herangezogen. Betrachtet werden die Referenzmessungen mit und ohne Bodeneinfluß am unversehrten Pfahl. Diese Messungen ermöglichen die Differenzierung der Pfahlmaterial- und Bodendämpfung. Mit Hilfe der Messungen am freistehenden Pfahl wird die Pfahlmaterialdämpfung bestimmt.

Tab. 6.1: Eigenschaften der Testpfähle

Herstellungsart:	Fertigpfahl (Laborbedingungen)
Durchmesser:	$d = 0,20 \text{ m}$
Länge:	$L = 3,56 \text{ m}$
Betongüte:	B25
Wellengeschwindigkeit:	ca. $c_D = 3500 \text{ m/s}$

Die Anpassungen der simulierten und gemessenen Geschwindigkeitsverläufe ergeben eine Materialdämpfung für das Berechnungsmodell von $PD = 10^{-4} \text{ Ns/m}^3$ und einen nach Gleichung (3.24) berechneten mittleren Dämpfungsparameter von $D = 0,020 \text{ 1/m}$. Auch für den freistehenden Pfahl tritt eine Dämpfung am Pfahlfußauflager auf. Bei den Untersuchungen wird der Pfahlfuß nicht starr angekoppelt, sondern ohne Verbund auf verschiedenen Medien abgestellt. Die Variation dieser Auflagermedien oder auch die Betrachtung des frei hängenden Pfahls zeigt im Vergleich zu der Größe der Pfahlmaterialdämpfung keinen signifikanten Einfluß der Dämpfung am Pfahlfuß.

Der Bodeneinfluß entlang des Pfahlschafts wird durch den Einbau von Sand in den Versuchsstand realisiert (vgl. Kap. 5.1). Als Baugrundinformationen liegen die Korngrößenverteilung des enggestuften Grobsandes (vgl. Tab. 5.1) und die Ergebnisse der Rammsondierung (vgl. Abb. 5.7) vor. In Abb. 6.7 sind das Bodenprofil, das Sondierergebnis und der daraus abgeleitete Dämpfungsverlauf für die Simulationsberechnung dargestellt. Aufgrund der Begrenzung des Versuchsstandes binden die Pfähle mit einer Länge von $L = 3,56 \text{ m}$ erst ab einer Tiefe von einem Meter unterhalb des Pfahlkopfs in den Sand ein.

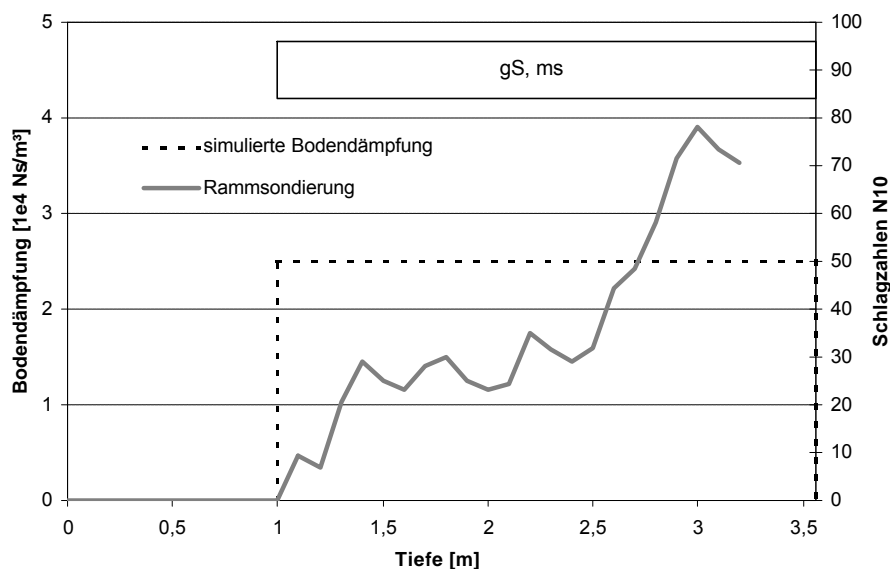


Abb. 6.7: Baugrundinformationen und simulierte Dämpfungsverteilung

Die Überlagerung des gemessenen und simulierten Geschwindigkeitsverlaufes wird in Abb. 6.8 dargestellt. Zur besseren Vergleichbarkeit ist die Teilchengeschwindigkeit auf die Geschwindigkeitsamplitude der Impulseinleitung normiert. Es zeigt sich ein relativ gleichmäßiger Einfluß des Bodens durch die Auslenkung des Verlaufs in den negativen Bereich. Der Einfluß ähnelt dem charakteristischen Verlauf einer konstanten oder linearen Verteilung der Bodendämpfung (vgl. Abb. 6.3). Bei dem vorliegenden geringen Dämpfungseinfluß des Bodens erhält man mit der vereinfachten Annahme einer konstanten Verteilung eine hohe Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation. Meßtechnische Einflüsse auf den Geschwindigkeitsverlauf werden bei den Simulationsberechnungen nicht abgebildet. Diese Einflüsse können aber durch den Vergleich mit der Messung am

freistehenden Pfahl zugeordnet werden. Der berechnete Gesamtdämpfungsparameter beträgt ca. $D = 0,091 \text{ 1/m}$ und ist gegenüber dem Faktor infolge der Materialdämpfung ca. viermal so groß.

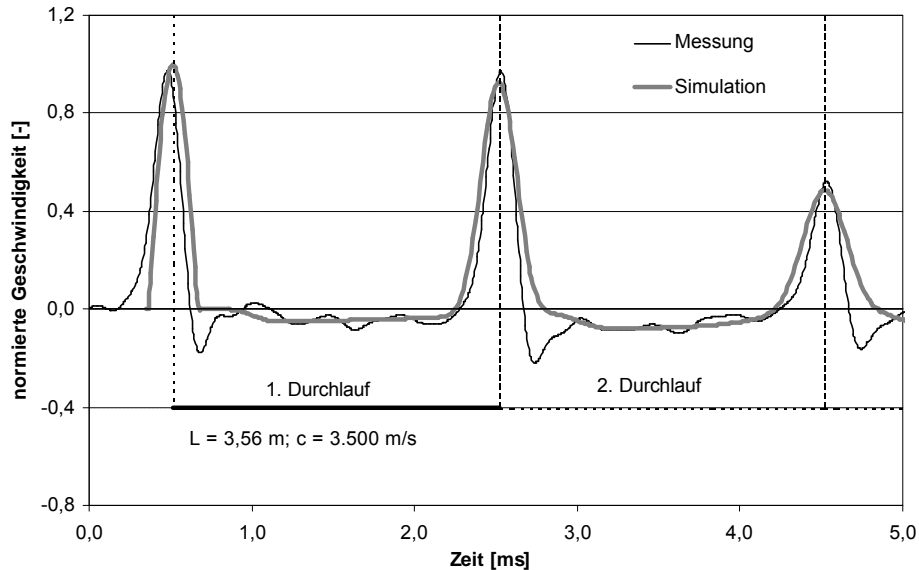


Abb. 6.8: Gemessener und simulierter Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

6.2.2 Spannbeton-Fertigpfähle

Fertigpfähle haben aufgrund ihrer Herstellung definierte Eigenschaften. Unter der Voraussetzung, daß durch das Einrammen der Pfähle keine Schäden verursacht werden, kann bei der Durchführung der Integritätsprüfung von konstanten Geometrie- und Materialeigenschaften ausgegangen werden. Somit können die Einflüsse der Bodendämpfung auf das Meßsignal eindeutig zugeordnet werden. Zur Untersuchung des Bodeneinflusses werden an mehreren Fertigpfählen vor und nach dem Einbau Messungen durchgeführt. Die Eigenschaften der Pfähle sind in Tab. 6.2 angegeben.

Tab. 6.2: Eigenschaften der Spannbeton-Fertigpfähle

Herstellungsart:	Spannbeton-Fertigpfahl, gerammt
Kantenlänge:	$B = 0,35 \text{ m}$ (quadratische Grundfläche)
Länge:	$L = 20,5 \text{ m}$
Betongüte:	B55
Wellengeschwindigkeit:	ca. $c_D = 4450 \text{ m/s}$

Das Meßergebnis vor dem Einbau und dessen Simulation ist Abb. 6.9 zu entnehmen. Analog zu den Testpfahlmessungen kann anhand der freiliegenden Messung die Pfahlmaterialdämpfung differenziert bestimmt werden.

Die simulierte Materialdämpfung von ca. $1,5 \cdot 10^{-5}$ Ns/m³ bei einem Dämpfungsparameter von $D = 0,014$ 1/m ist gegenüber dem Testpfahl geringer. Die Vorspannung der Pfähle bewirkt einen Druckzustand im Beton, der Einfluß auf die Wellenausbreitung und damit auf den Geschwindigkeitsverlauf hat.

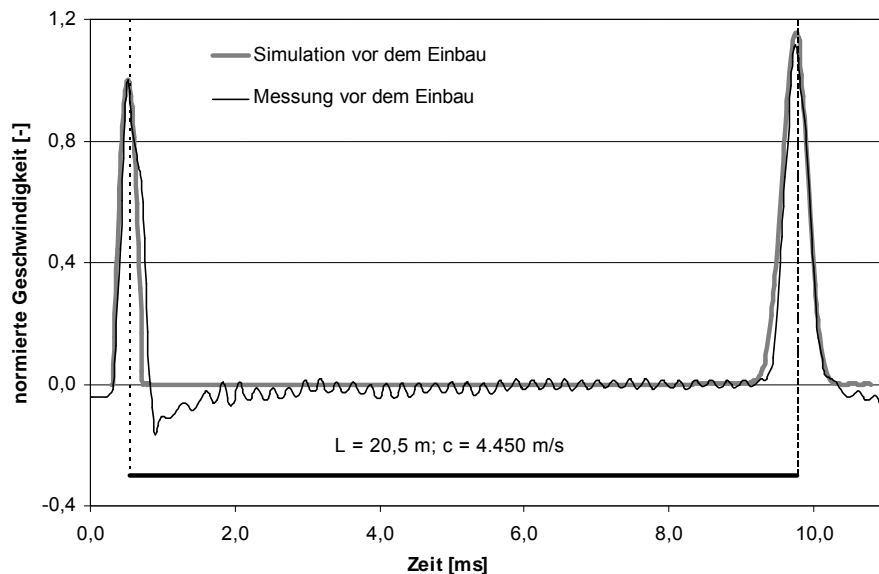


Abb. 6.9: Gemessener und simulierter Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf vor dem Einbau

Bei der Messung nach dem Einbau verändert sich der Geschwindigkeitsverlauf infolge der Bodendämpfung. Um den Einfluß der Bodendämpfung zu analysieren und eine Dämpfungsverteilung für die Simulation zu bestimmen, stehen Baugrundinformationen in Form von Bodenprofilen und Drucksondierungen zur Verfügung. Die auf den Pfahl übertragenen Baugrunddaten einschließlich des Verlaufs der simulierten Bodendämpfung sind Abb. 6.10 zu entnehmen.

Der simulierte Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 6.11 dem gemessenen Verlauf gegenübergestellt. Aus dem Vergleich des Meßsignals mit der Mantelreibungsverteilung der Drucksondierung (DS), der Bodenschichtung laut Bohrprofil und dem simulierten Bodendämpfungsverlauf kann abgeleitet werden, daß die Bodendämpfung bis in eine Tiefe von ca. 11,5 m gering ist. Die Auffüllung, die Muddeschicht (F, U) und die obere feinkiesige Sandschicht (S, fg) führen zu niedriger Bodendämpfung und Mantelreibung (DS).

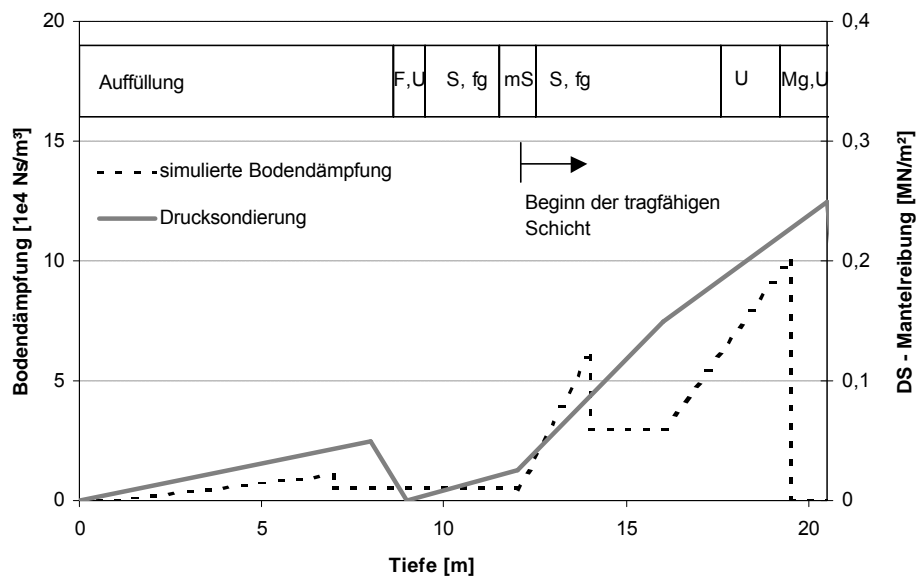


Abb. 6.10: Baugrundinformationen und simulierte Dämpfungsverteilung

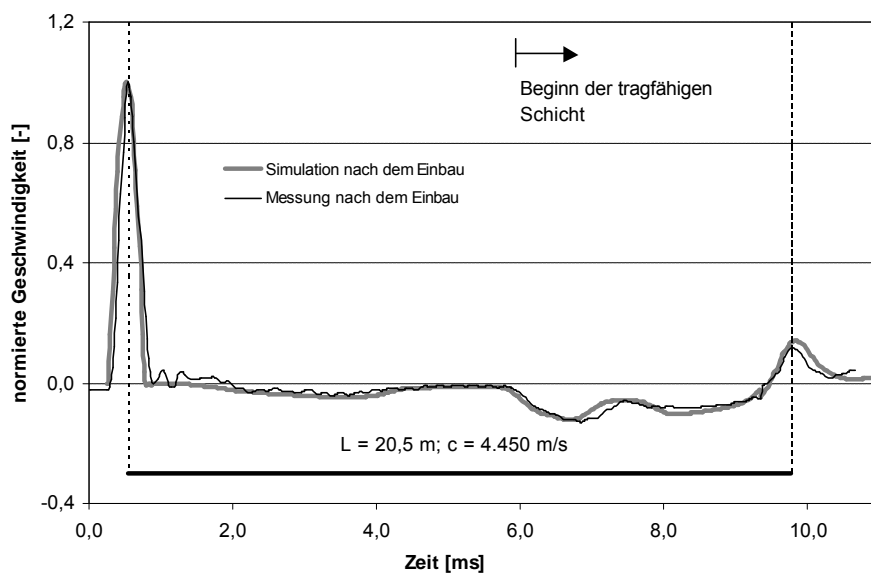


Abb. 6.11: Gemessener und simulierter Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf nach dem Einbau

Mit Beginn der Mittelsandschicht (mS) steigen sowohl die Bodendämpfung als auch die Mantelreibung (DS) deutlich an. Die untere feinkiesige Sandschicht (S, fg) weist dabei stark abweichende Eigenschaften gegenüber der oberen identischen Bodenart auf. Weder im Verlauf der Bodendämpfung noch bei der Mantelreibung (DS) ist der Schichtwechsel zur Schluffschicht (U) zu erkennen. Mit Beginn des Geschiebemergels (Mg, U) läßt die Bodendämpfung sprunghaft nach.

Der berechnete mittlere Gesamtdämpfungsparameter beträgt ca. $D = 0,094 \text{ 1/m}$ und ist gegenüber dem Dämpfungsparameter infolge der Materialdämpfung ca. siebenmal so groß.

Der Gesamtdämpfungsparameter hat somit eine ähnliche Größe wie bei den Testpfahlmessungen. Aufgrund der fast sechsfachen Pfahllänge wirkt sich die Dämpfung aber sehr viel stärker auf die Größe der Pfahlfußreflexion aus.

Auf Grundlage der Baugrunddaten wird eine Dämpfungsverteilung gefunden, für die der gemessene und der simulierte Geschwindigkeitsverlauf eine hohe Übereinstimmung zeigt. Die Schichtgrenzen spiegeln sich dabei nur teilweise in der Bodendämpfung wider. Zwischen den Ergebnissen der Drucksondierung und der Bodendämpfung bestehen generelle Übereinstimmungen.

6.2.3 Ortbeton-Rammpfähle

Bei dem dritten Fallbeispiel handelt es sich um bewehrte Ortbeton-Rammpfähle, mit den in Tab. 6.3 angegebenen Eigenschaften. Bei Ortbetonpfählen ist aufgrund der Herstellung keine Messung vor und nach der Einbringung und somit keine Differenzierung von Pfahlmaterial- und Bodendämpfung möglich. Auf Grundlage der Erkenntnis von bereits durchgeführten Simulationen und durch eine schrittweise Anpassung von gemessenem und berechnetem Geschwindigkeitsverlauf wird für den betrachteten Pfahl eine konstante Materialdämpfung von $PD = 10^{-5} \text{ Ns/m}^3$ angenommen.

Tab. 6.3: Eigenschaften der Ortbeton-Rammpfähle

Herstellungsart:	Ortbeton-Rammpfahl
Durchmesser:	d = 0,62 m
Länge:	L = 9,5 m
Betongüte:	B25
Wellengeschwindigkeit:	ca. $c_D = 4000 \text{ m/s}$

Als Baugrundinformation liegt lediglich ein Bohrprofil vor. Der Abstand des hier betrachteten Pfahls zum Bohrpunkt beträgt ca. 25 m. Für die Auswertung der Baugrundinformationen bezüglich des Bodendämpfungsverhaltens des Pfahls ist zum einen die geringe Anzahl der Baugrunddaten sowie zum anderen die Übertragbarkeit des Bodenprofils bei größerem Abstand zwischen Bohrloch und Pfahl problematisch.

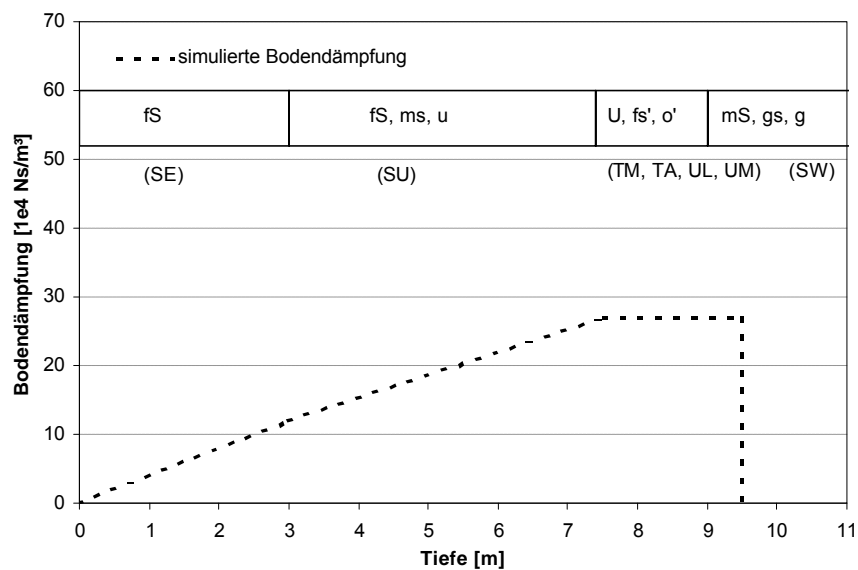


Abb. 6.12: Baugrundinformation und simulierte Dämpfungsverteilung

Das Bodenprofil und die Dämpfungsverteilung für die Simulationsberechnung ist in Abb. 6.12 dargestellt. Es zeigt sich ein Zusammenhang zwischen dem Schichtwechsel von Feinsand (fs, ms, u) zu Schluff (U, fs', o') in einer Tiefe von 7,5 m. Während der Feinsand einen linearen Dämpfungsanstieg erzeugt, bleibt die Dämpfung in der Schluffschicht konstant.

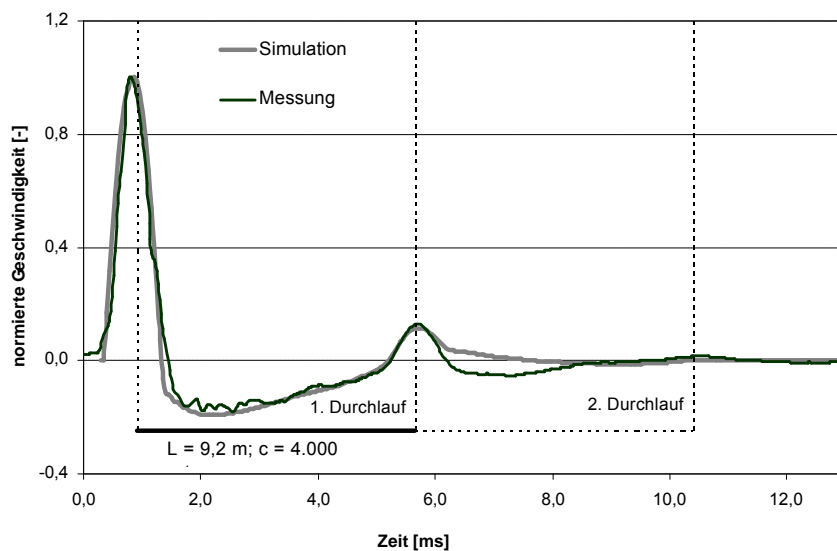


Abb. 6.13: Gemessener und simulierter Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf

Der Vergleich von gemessenem und simuliertem Geschwindigkeitsverlauf zeigt eine hohe Übereinstimmung bis zur ersten Pfahlfußreflexion (Abb. 6.13). Aus dem Bodenaufbau können Rückschlüsse auf den Verlauf der Bodendämpfung gezogen werden. Der berechnete mittlere Gesamtdämpfungsparameter beträgt ca. $D = 0,134 \text{ 1/m}$ und ist somit größer als die ermittelten Dämpfungsparameteren bei den betrachteten Fertigpfählen.

6.3 Zusammenfassung der Untersuchungen zum Bodeneinfluß

Neben den drei vorgestellten Fallbeispielen werden im Rahmen der Untersuchungen weitere Beispiele betrachtet. Im folgenden wird ein Überblick der Ergebnisse gegeben. Als wesentliche Dämpfungseinflüsse sind die Pfahlmaterialdämpfung und die Verteilung der Bodendämpfung entlang des Pfahlmantels anzusehen.

Zwischen der Materialdämpfung und den betrachteten Pfahlherstellverfahren (Fertigpfähle, Ortbeton-Rammpfähle und Bohrpfähle) ist kein eindeutiger Zusammenhang zu erkennen. Die Materialdämpfung ist um so geringer, je höher die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist. Dieses ist durch die Abhängigkeit der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von dem Elastizitätsmodul nach Gleichung (3.6) und die Abhängigkeit der Dämpfung von der Steifigkeit bzw. von dem Elastizitätsmodul nach Gleichung (3.34) zu erklären.

Betrachtet man die Bodendämpfung, können meistens Übereinstimmungen zwischen den resultierenden Lagerungsdichten aus Druck- oder Rammsondierungen und den berechneten Dämpfungsverteilungen festgestellt werden. Von der Lagerungsdichte auf die Größe der Bodendämpfung zu schließen ist jedoch nicht möglich.

Die Erkennbarkeit von Bodenschichtwechseln wird hauptsächlich durch die Arten der aneinandergrenzenden Böden bestimmt. Übergänge zwischen Auffüllungen und Klei sowie Torf und Sand bzw. Kies spiegeln sich eindeutig im Geschwindigkeitsverlauf wider. Im Grenzbereich zwischen Schluff und Sand treten bei mehreren Pfählen Unstetigkeiten auf, die jedoch nicht eindeutig zugeordnet werden können. Für Bodenarten, die sich nur in Nebenanteilen unterscheiden, ist keine signifikante Änderung der Bodendämpfung feststellbar. Quantitative Aussagen über die Größe der Dämpfung bei den unterschiedlichen Bodenarten sind nicht möglich.

Wenn ein signifikanter Bodeneinfluß auf den Geschwindigkeitsverlauf vorliegt, kann dieser mit einer Berechnung simuliert werden. Die hierbei erforderliche Dämpfungsverteilung wird qualitativ aus den Baugrundinformationen ermittelt. Um eine verbesserte Übereinstimmung zwischen dem simulierten und dem gemessenen Geschwindigkeitsverlauf zu erzielen, ist es in den meisten Fällen erforderlich, den Ansatz für die Verteilung der Bodendämpfung schrittweise anzupassen. Eine Steigerung der Genauigkeit kann nur dann erreicht werden, wenn zusätzliche, detaillierte Baugrundinformationen in Pfahlnähe vorliegen. Aufgrund des hohen Aufwandes einer Baugrunderkundung ist dieses für eine Standardmessung nicht realistisch.

Das für die Simulationen verwendete eindimensionale Berechnungsmodell bildet die wesentlichen Dämpfungseinflüsse ausreichend ab. Der Aufwand für die Betrachtung eines mehrdimensionalen Modells ist aufgrund der geringen Baugrundinformationen, wie sie in fast allen betrachteten Fällen vorliegt, nicht gerechtfertigt.

7 Untersuchungen zur Auswertung von Integritätsprüfungen

Neben der Meßmethodik bestimmt die Art und Weise der Auswertung die Aussagemöglichkeiten der Prüfmethode. Aufbauend auf der Standardmeßanalyse im Zeitbereich wird die Anwendung von Korrelationsalgorithmen, die Analyse im Frequenzbereich und die Entwicklung einer Meßsignalidentifikation untersucht.

7.1 Möglichkeiten der Meßanalyse zur Interpretation des Zeitsignals

Zunächst werden die Möglichkeiten und Grenzen der Standardmeßanalyse im Zeitbereich vorgestellt, wie sie in gebräuchlichen Meßanalyseprogrammen zur Auswertung des zur Geschwindigkeit integrierten Beschleunigungssignals vorhanden sind.

Die Standardauswertung besteht derzeit im wesentlichen aus der visuellen Beurteilung des Geschwindigkeitsverlaufs. Hierbei werden die Laufzeitdifferenzen der Reflexionspeaks eines Geschwindigkeitsverlaufs bestimmt und über die Vorgabe einer Wellengeschwindigkeit der Längenabmessung des Pfahles bzw. eventuell vorhandenen Fehlstellen zugeordnet. Um dieses zu ermöglichen, stehen verschieden Meßanalysefunktionen zur Verfügung [28].

Zur Erzielung eines eindeutig interpretierbaren Geschwindigkeitsverlaufs werden mehrere Meßsignale durch Mittelwertbildung überlagert. Der resultierende charakteristische Verlauf eines Pfahls beinhaltet neben meßtechnischen Störeinflüssen auch die Auswirkungen des Bodeneinflusses. Diese Auswirkungen erschweren die Interpretation des Geschwindigkeitsverlaufs. Um dennoch eine Beurteilung zu ermöglichen, werden Frequenzfilter eingesetzt. Sie basieren auf einer Transformation in den Frequenzbereich, einer Begrenzung des Frequenzbandes und einer anschließenden Rücktransformation in den Zeitbereich. Zur Transformation wird normalerweise eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) verwendet, die in Kap. 7.3 genauer erläutert wird. Wenn hochfrequente meßtechnische Störeinflüsse oder Querschwingungen aufgrund mehrdimensionaler Effekte der Wellenausbreitung (vgl. Abb. 3.3) auftreten, werden diese durch eine obere Begrenzung des Frequenzbandes aus dem Geschwindigkeitsverlauf eliminiert. Wenn ein starker Einfluß des Bodens auf die Wellenausbreitung besteht, führt dieses, wie in Kap. 6 beschrieben, zu einer niederfrequenten Auslenkung des Geschwindigkeitsverlaufes in den negativen Bereich. Dieser Einfluß kann durch eine untere Begrenzung des Frequenzbandes aus dem Geschwindigkeitsverlauf eliminiert werden. Die Anwendung von Frequenzfiltern beinhaltet die Gefahr, daß auch Informationen über die Pfahlbeschaffenheit eliminiert werden. Zum anderen können die zeitliche Position und der Betrag der Teilchengeschwindigkeit eines Reflexionspeaks verändert werden. Dieses führt zu einer Änderung der Laufzeitdifferenzen und somit zu Abweichungen bei der Längenbestimmung. Aufgrund des geänderten Betrages der Teilchengeschwindigkeit ist eine genaue Analyse der Fehlstellentiefe nicht möglich (vgl. Kap. 5.4.2). Um derartige Effekte zu vermeiden, ist bei der Anwendung von Frequenzfiltern eine genau angepaßte Begrenzung des Frequenzbandes erforderlich.

Neben der niederfrequenten Auslenkung als Einfluß des Bodens ist eine Dämpfung der

Pfahlfußreflexion vorhanden. Die Dämpfung ist häufig so groß, daß die Interpretation der Pfahlfußreflexion bereits nach dem ersten Wellendurchgang erschwert ist. Um dennoch eine Laufzeitdifferenz bestimmen zu können, wird der Bodeneinfluß durch den Ansatz einer Verstärkungsfunktion eliminiert. Mit dieser Funktion wird jedoch nicht versucht, den tatsächlichen Verlauf der Bodendämpfung anzunähern. Es handelt sich hierbei lediglich um eine Exponentialfunktion, die mit dem Geschwindigkeitsverlauf multipliziert wird und ab einem vorgegebenen Zeitpunkt in eine konstante Verstärkung übergeht. Die Anwendung der Verstärkung beinhaltet die Gefahr, daß bei nicht eindeutigen Geschwindigkeitsverläufen ein falscher Reflex als Fußreflexion gedeutet wird. Bei Verwendung hoher Verstärkungsfaktoren wird der Geschwindigkeitsverlauf sehr stark verändert, und es kann zu einer Verfälschung des Signals kommen. Aufgrund der Verstärkung wird die Größe der gemessenen Teilchengeschwindigkeit verändert. Dieses verhindert ebenfalls eine Quantifizierung der Fehlstellenausbildung.

In dem entwickelten Meßanalyseprogramm, das Teil des in Kap. 4 vorgestellten Meßsystems ist, sind die beschriebenen Möglichkeiten der Standardmeßanalyse enthalten. Diese sind für die in Kap. 4 bis 6 beschriebenen Untersuchungen erprobt und verwendet worden.

7.2 Untersuchung der Anwendung von Korrelationsalgorithmen

Im folgenden werden die Grundlagen von Korrelationsalgorithmen kurz erläutert. Die Anwendungsmöglichkeiten zur Auswertung von Pfahlintegritätsprüfungen werden vorgestellt und anhand der Testpfahlmessungen untersucht.

7.2.1 Grundlagen

Die Korrelation ist der zentrale Begriff in der Theorie der Zufallsprozesse, um statistische Erhaltung zu beschreiben [56]. Eine Korrelation zwischen den Ordinaten eines einzigen Prozesses bezeichnet man als Autokorrelation und die Korrelation zwischen den Ordinaten verschiedener Prozesse als Kreuzkorrelation oder gegenseitige Korrelation. Beide Arten sind Korrelationen physikalischer Prozesse [56].

Die Korrelation kann auf deterministische Signale, deren Signalverlauf sich aufgrund der mathematischen Beschreibung vorausbestimmen läßt, und auf quasistochastische Signale, welche deterministische Anteile enthalten, angewendet werden [62].

Meßsignale können deterministische oder stochastische Störsignale enthalten. Deterministische Störsignale bedürfen der Korrektur, zum Beispiel durch Interpolation und stochastische Störsignale werden durch geeignete statistische Verfahren, wie zum Beispiel die Korrelation, eliminiert.

Durch die Korrelation kann die Erhaltungstendenz eines Signals, die auch als innere Kohärenz bezeichnet wird, beurteilt werden. Untersucht man die Frage, ob zwischen den

Wertepaaren $x_k(t)$ und $x_k(t+\tau)$ eine lineare statistische Abhängigkeit besteht, so können für eine Meßreihe x_k (mit $2n$ Meßwerten) die Autokorrelationskoeffizienten c_i wie folgt berechnet werden:

$$c_i = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \cdot x_{k+i} \quad \text{mit } i = 0, \dots, n-1 \quad \text{und} \quad x_{k+i} = 0 \text{ für } k+i = n, \dots, 2(n-1) \quad (7.1)$$

Für $i = 0$ erhält man:

$$c_0 = \sum_{k=0}^{n-1} x_k^2 \quad (7.2)$$

Der Wert c_0 ist verwandt mit der Varianz und trifft eine Aussage über die Streuung der Wertereihe x_k . Für eine bessere Vergleichsmöglichkeit werden bei der Autokorrelation typischerweise die normierten Werte c_i/c_0 angegeben. Je strenger die lineare Abhängigkeit, um so größer ist der Betrag des Korrelationskoeffizienten. Es ist dann aufgrund der Kenntnis des Funktionswertes $x_k(t)$ zur Zeit t möglich, eine statistische Vorhersage des Funktionswertes $x_k(t+\tau)$ zur Zeit $t+\tau$ zu treffen. Für die Zeitspanne τ besteht eine gewisse innere Kohärenz, eine Erhaltungstendenz. Die untersuchte Zeitspanne τ ist frei wählbar, der Korrelationskoeffizient ist somit eine Funktion der Variablen τ . Man spricht in diesem Zusammenhang von der Autokorrelationsfunktion. Im Gegensatz zu den Korrelationskoeffizienten der diskreten Wertepaare wird die Autokorrelationsfunktion, die sich auf das im allgemeinen stetige Signal $x(t)$ bezieht, oft nicht normiert. An die Stelle der Summen der diskreten Werte treten Integrale. Die Autokorrelationsfunktion für stochastische Signale ist wie folgt definiert:

$$f_{xx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_k(t) \cdot x_k(t+t) dt \quad (7.3)$$

Bei diskreten Funktionen sind die Integrale durch entsprechende Summen zu ersetzen:

$$f_{xx}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \sum_{-T}^T x_k(t) \cdot x_k(t+t) \quad (7.4)$$

Für große Zeitverschiebungen τ erwartet man im allgemeinen, daß die Erhaltungstendenz kleiner wird. Die Gleichheit der Signale bei $\tau = 0$ ergibt ein Höchstmaß an statistischer Verwandtschaft. Eine wesentliche Eigenschaft der Autokorrelationsfunktion ist, daß sie keine Information mehr über die Phasenbeziehungen einzelner Frequenzkomponenten enthält.

Normalerweise tritt bei großen Verschiebungszeiten τ keine große Verwandtschaft mehr auf. Mit Ausnahme von Gleichanteilen und Signalen mit periodischen Komponenten klingen Autokorrelationsfunktionen deshalb auf Null ab.

In technischen Anwendungen interessiert nicht nur die Korrelation von $x_k(t)$ und $x_k(t+\tau)$, sondern auch die statistische Verwandtschaft von zwei verschiedenen Signalen $x_k(t)$ und $y_k(t)$. Dieses können beispielsweise die Signale zweier Messungen sein.

Für zwei Meßreihen x_k und y_k , (mit $2n$ Meßwerten) können die Korrelationskoeffizienten c_i folgendermaßen berechnet werden:

$$c_i = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \cdot y_{k+i} \quad \text{mit } i = 0, \dots, n-1 \text{ und } y_{k+i} = 0 \text{ für } k+i = n, \dots, 2(n-1) \quad (7.5)$$

Für $i = 0$ erhält man:

$$c_0 = \sum_{k=0}^{n-1} x_k \cdot y_k. \quad (7.6)$$

Dieser Ausdruck ist verwandt mit der Kovarianz der beiden Meßreihen. Auch bei dieser sogenannten Kreuzkorrelation werden wegen der besseren Vergleichsmöglichkeit die normierten Werte c_i/c_0 angegeben. Die Kreuzkorrelationsfunktion für stochastische Signale ist wie folgt definiert:

$$f_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x_k(t) \cdot y_k(t+t) dt \quad (7.7)$$

Bei diskreten Funktionen sind die Integrale durch entsprechende Summen zu ersetzen:

$$f_{xy}(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \sum_{-T}^T x_k(t) \cdot y_k(t+t) \quad (7.8)$$

Bei Kreuzkorrelationsfunktionen liegen die interessierenden, das heißt großen Funktionswerte nur selten in der Nähe von $\tau = 0$, sondern unter Umständen weit davon entfernt. Die größte statistische Verwandtschaft existiert also für $\tau_{\max} \neq 0$. Die Kreuzkorrelationsfunktion enthält im Gegensatz zur Autokorrelation für periodische Signalanteile noch eine Phaseninformation [62]. Bei der Anwendung der Korrelationsfunktion wird ausgenutzt, daß inkohärente Signalanteile, d.h. unkorrelierte Signalanteile aus verschiedenen Signalquellen ohne statistische Verwandtschaft keinen Beitrag zur Kreuzkorrelationsfunktion liefern. Dieses wird als Kohärenzselektion bezeichnet. Signalanteile aus gleicher Signalquelle bei statistischer Verwandtschaft innerhalb der Korrelationsdauer tragen zur Kreuzkorrelationsfunktion bei [62].

7.2.2 Anwendungen in der Seismik

Die Korrelationsanalyse wird im Bereich der Geophysik bzw. Seismik häufig angewendet. Sie dient der Analyse eines Signals durch Autokorrelation zur Entdeckung oder Heraushebung deterministischer Anteile aus begleitendem Rauschen. Dabei geht es um die Entdeckung deterministischer Signale, die im Zeitbereich durch Rauschen bis zur Unkenntlichkeit verzerrt sein können. Insbesondere ist die Entdeckung periodischer Signale gut möglich, da diese auch für größere Verschiebungszeiten τ nicht verschwinden. Weitere Anwendungen sind die Bestimmung des Übertragungsverhaltens dynamischer Systeme durch Kreuzkorrelation, die Ermittlung von Laufzeiten [73], die Bestimmung von

Zeitverschiebungen bzw. Laufzeitdifferenzen und die Ortung von Schwingungsquellen oder Störquellen [62].

7.2.3 Anwendungsmöglichkeiten zur Auswertung von Integritätsprüfungen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die Anwendung von Korrelationsalgorithmen als neue Möglichkeit zur Auswertung von Pfahlintegritätsprüfungen untersucht. Betrachtet man die Anwendungsgebiete in der Seismik, können diese sinnvoll auf die Wellenausbreitungsprozesse im Pfahl übertragen werden. Die Korrelation als Analyse im Zeitbereich ermöglicht Aussagen über die Erhaltungstendenz bzw. die Entdeckung deterministischer Anteile. Die Form des eingeleiteten Stoßimpulses bleibt bei den auftretenden Pfahlfuß- und Fehlstellenreflexionen erhalten und kann mit der Korrelation entdeckt werden. Diese ermöglicht eine sehr genaue Bestimmung von Laufzeitdifferenzen. Weiterhin haben inkohärente Signalanteile keinen Beitrag an der Kreuzkorrelation, so daß z.B. meßtechnische Störsignale eliminiert werden können.

Als Beispiel der Anwendung einer Autokorrelation wird ein idealisierter Geschwindigkeitsverlauf $x(t)$ betrachtet (Abb. 7.1). Als Ergebnis der Autokorrelation ergibt sich der Funktionsverlauf $\Phi_{xx}(\tau)$. Dieser ermöglicht eine exakte Bestimmung der Laufzeitdifferenzen.

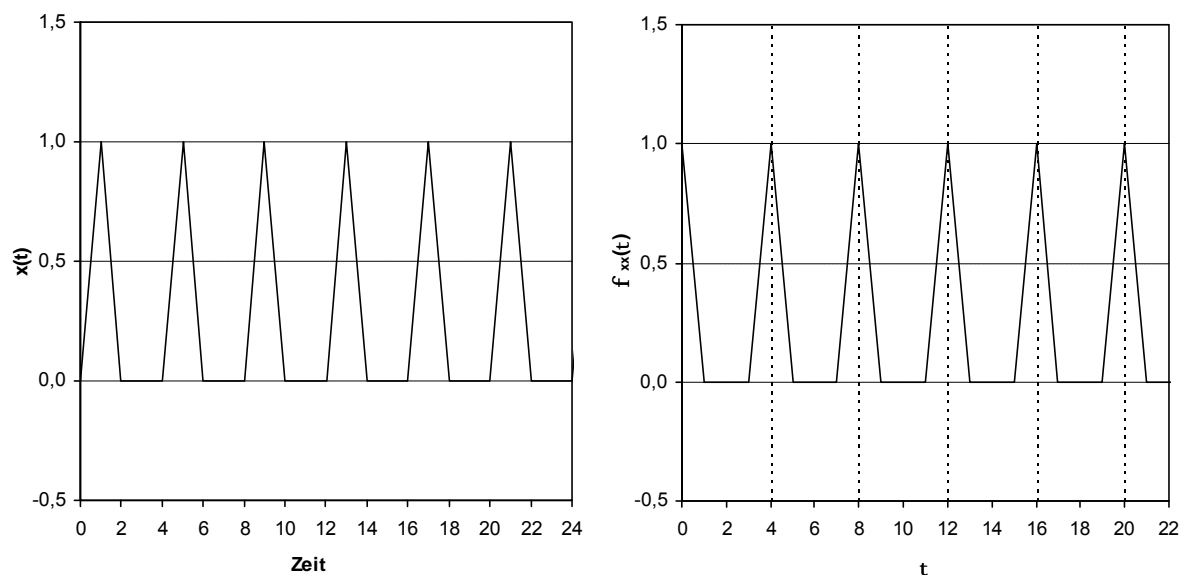


Abb. 7.1: Idealisiertes Beispiel zur Anwendung der Autokorrelation

Geeigneter für die Anwendung zur Auswertung von Integritätsprüfungen ist die Kreuzkorrelation. Als idealisiertes Beispiel für ein Meßsignal ist in Abb. 7.2 der Verlauf eines Stoßimpulses $x(t)$ und eines Geschwindigkeitsverlaufs $y(t)$ abgebildet.

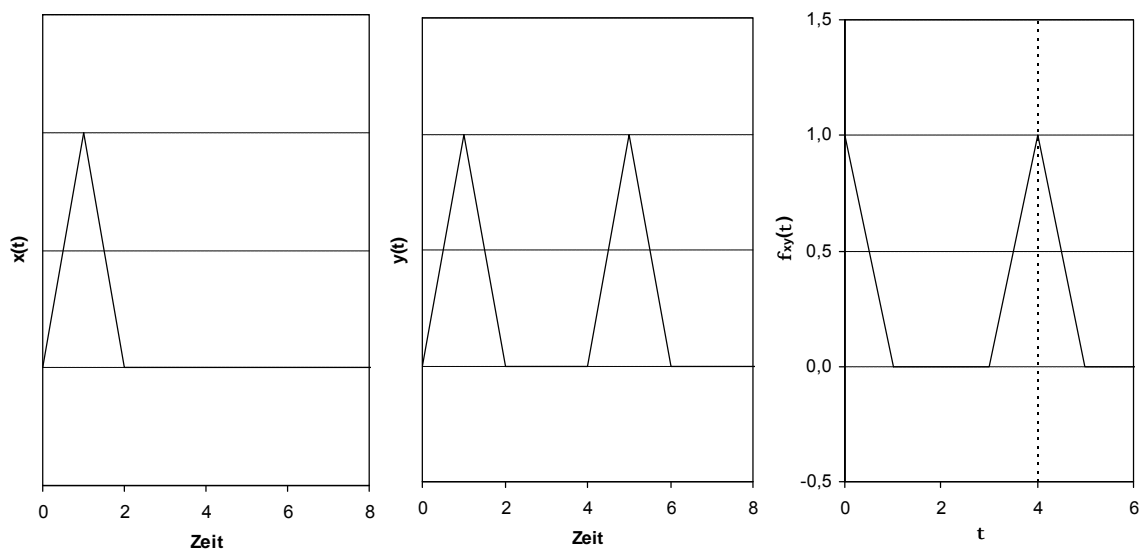


Abb. 7.2: Idealisiertes Beispiel zur Anwendung der Kreuzkorrelation

Aus dem resultierenden Verlauf der Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{xy}(\tau)$ kann die exakte Laufzeit z.B. zur Bestimmung der Pfahllänge aufgrund der Nullphasigkeit direkt abgelesen werden. Die Ordinaten der Maxima der Kreuzkorrelation lassen keine direkten Rückschlüsse auf die Ordinaten der Maxima der Teilchengeschwindigkeit zu [62]. Somit können die Maxima der Kreuzkorrelation nicht zur Bestimmung der Fehlstellentiefe herangezogen werden.

Neben der Kreuzkorrelation zwischen Stoßimpulseinleitung und Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf kann die Korrelation auch zur Bestimmung der abschnittweisen Zeitdifferenzen zwischen verschiedenen Meßebenen entlang der Pfahlachse, wie z.B. bei den Testpfahlmessungen, angewendet werden.

Zusätzlich zur Bestimmung der Laufzeitdifferenzen können bei der Anwendung der Kreuzkorrelation inkohärente Signalanteile eliminiert werden. Dieses wird bei der Anwendung anhand der Testpfahlmessungen gezeigt.

7.2.4 Auswertung der Testpfahlmessungen mit Hilfe der Kreuzkorrelation

Zur Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten der Kreuzkorrelation zur Auswertung von Integritätsprüfungen werden sämtliche durchgeführte Geometrievariationen der Testpfahlmessungen mit Hilfe der Kreuzkorrelation analysiert (vgl. Tab. 5.2) [8]. Die Ergebnisse werden anhand von ausgewählten Variationen vorgestellt.

Um die Meßanalyse durchzuführen, wird ein Korrelationsalgorithmus programmiert und in das entwickelte Meßanalyseprogramm (vgl. Kap. 4.1) eingebunden.

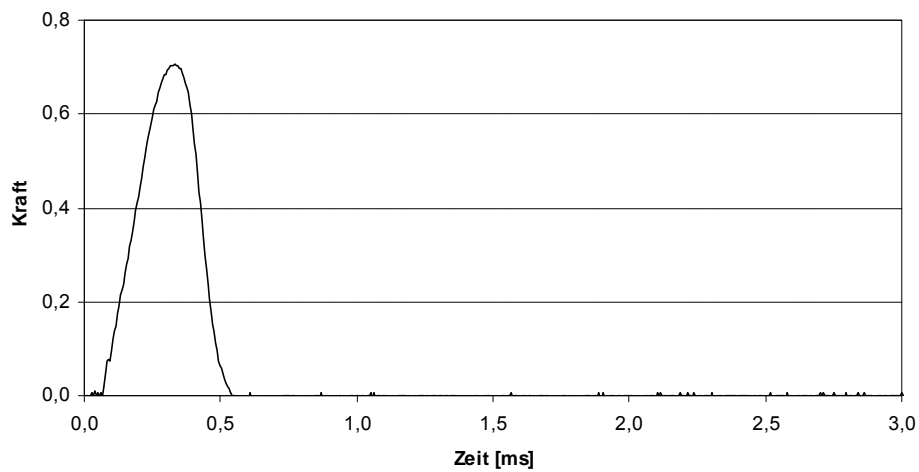


Abb. 7.3: Stoßimpulseinleitung $x(t)$ bei der Referenzmessung von Pfahl 1

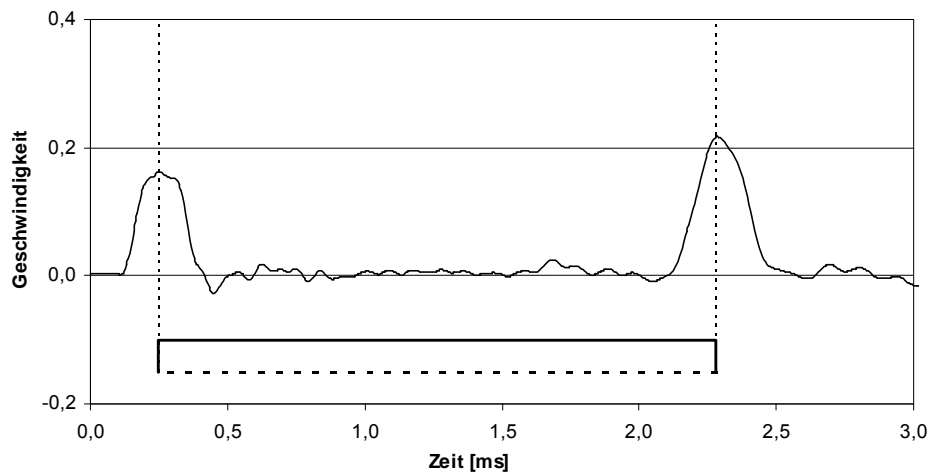


Abb. 7.4: Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ am Pfahlkopf bei der Referenzmessung von Pfahl 1

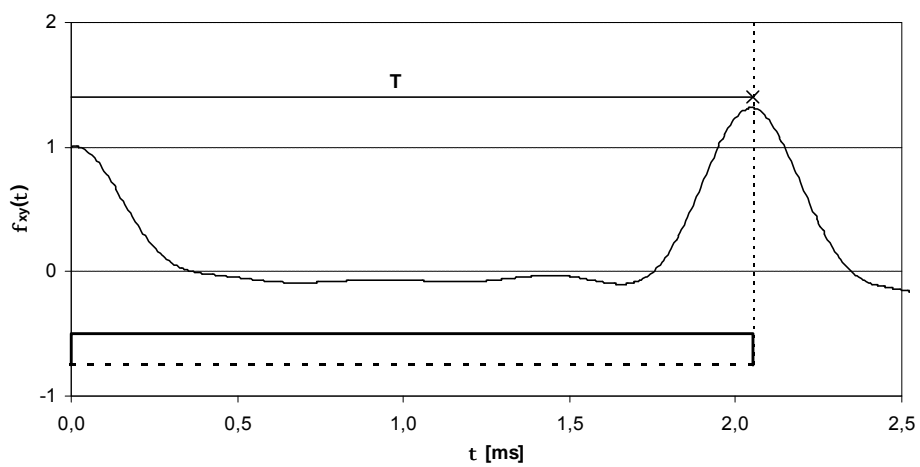


Abb. 7.5: Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{xy}(\tau)$ bei der Referenzmessung von Pfahl 1

Als erstes Beispiel dient die Referenzmessung am unversehrten Pfahl 1. In Abb. 7.3 ist der gemessene Verlauf der Stoßkraft $x(t)$ und in Abb. 7.4 der resultierende Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ am Pfahlkopf gezeigt. Das Ergebnis der Kreuzkorrelation $\Phi_{xy}(\tau)$ ist Abb. 7.5 zu entnehmen. Aufgrund der Nullphasigkeit der Kreuzkorrelation kann die Laufzeit T direkt abgelesen werden. Sehr deutlich wird auch die Eliminierung von inkohärenten Signalanteilen, die auf meßtechnische Störeinflüsse zurückzuführen sind.

Beispielhaft für die Anwendung der Kreuzkorrelation für einen Pfahl mit Fehlstelle werden die Ergebnisse von Geometrievariation 24 vorgestellt (vgl. Tab. 5.2). Der gemessene Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf ist in Abb. 7.6 dargestellt.

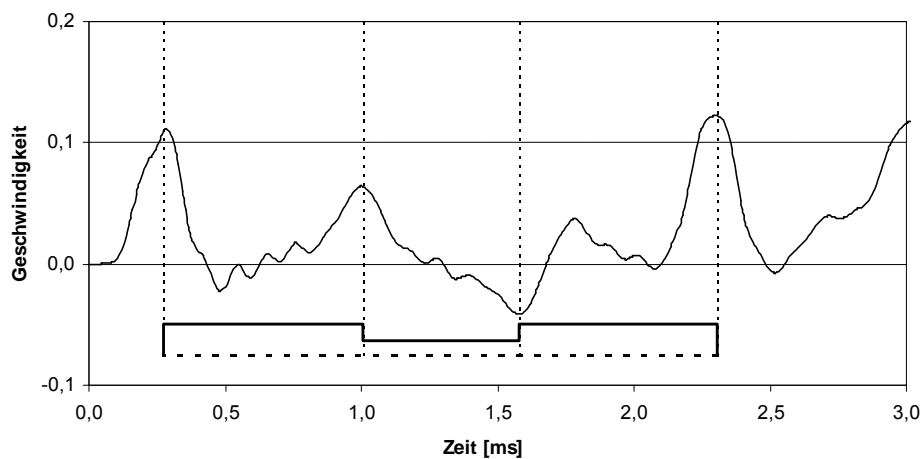


Abb. 7.6: Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ am Pfahlkopf bei der Variation 24

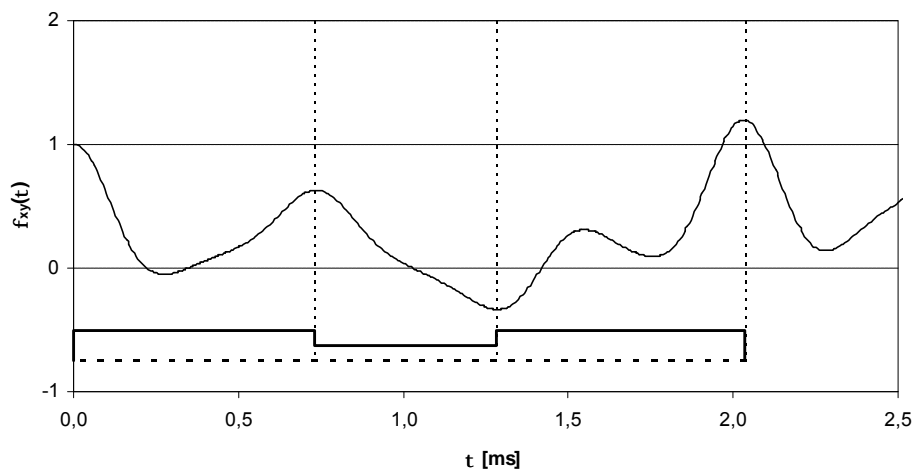


Abb. 7.7: Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{xy}(\tau)$ bei der Variation 24

Das Ergebnis der Kreuzkorrelation $\Phi_{xy}(\tau)$ zwischen der Stoßkraft $x(t)$ und dem Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ ist in Abb. 7.7 abgebildet. Neben der Laufzeitdifferenz zum Pfahlfußreflex können auch die Zeitdifferenzen zu den Fehlstellenreflexionen direkt abgelesen werden. Die Eliminierung der inkohärenten Signalanteile ermöglicht eine recht genaue Bestimmung der Reflexionsmaxima bzw. -minima.

Neben der Bestimmung der Laufzeitdifferenzen des Geschwindigkeitsverlaufes am Pfahlkopf kann die Kreuzkorrelation zur Bestimmung der abschnittweisen Zeitdifferenzen der erweiterten Meßkette (vgl. Abb. 5.6) zwischen mehreren Ebenen entlang der Pfachlache ermittelt werden.

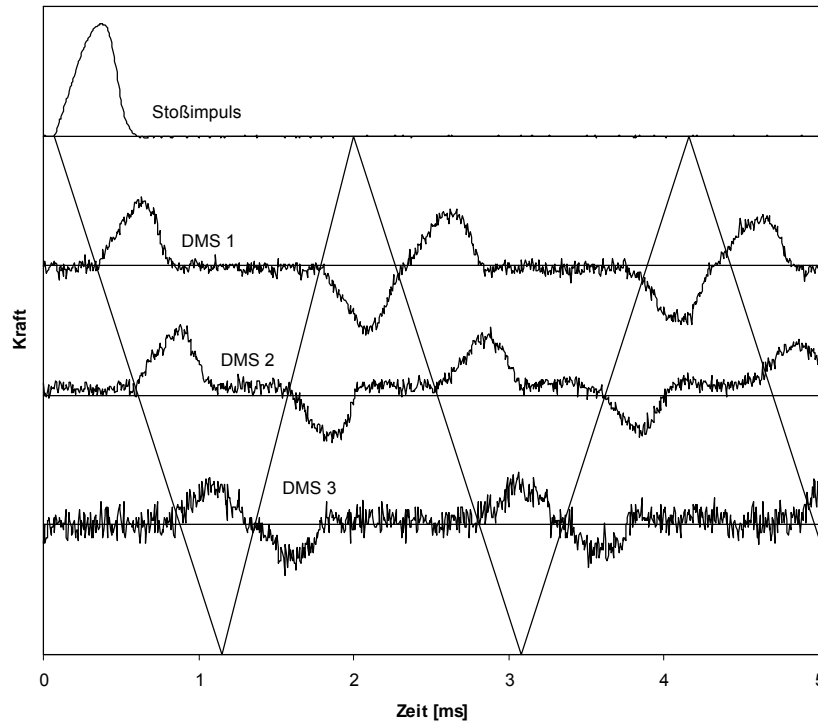


Abb. 7.8: Meßergebnisse der DMS-Aufnehmer bei der Referenzmessung am Pfahl 3

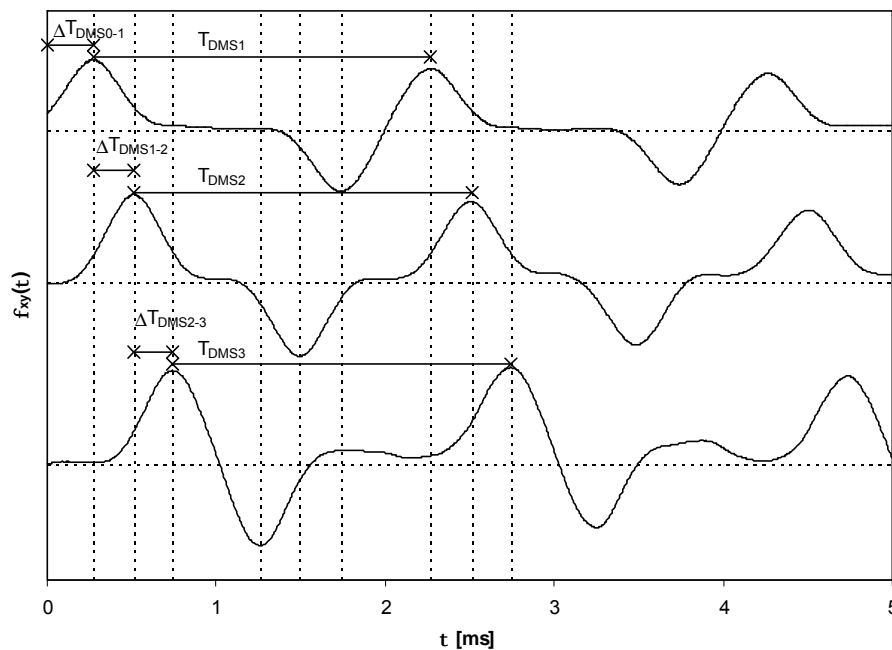


Abb. 7.9: Autokorrelationsfunktionen $\Phi_{xy}(\tau)$ bei der Referenzmessung am Pfahl 3

Die Meßergebnisse der zusätzlichen Ebenen bei der Referenzmessung am Pfahl 3 sind in Abb. 7.8 gezeigt. Die Kreuzkorrelationen $\Phi_{xy}(\tau)$ der Stoßkraft $x(t)$ mit den Kraftverläufen $y(t)$ der drei DMS-Meßebeben sind in Abb. 7.9 abgebildet. Neben den Laufzeitdifferenzen T_{DMS} eines vollständigen Wellendurchgangs können die Laufzeitdifferenzen ΔT_{DMS} zwischen den Maßebenen zur Ermittlung der abschnittweisen Wellengeschwindigkeit genau bestimmt werden. Die Filterung inkohärenter Signalanteile der verrauschten DMS-Meßsignale wird deutlich. Im Gegensatz zu einer Frequenzfilterung verschiebt sich durch die Korrelation die zeitliche Lage der Maxima bzw. Minima nicht. Die Ergebnisse der untersten DMS-Meßebeben, die aufgrund des starken Rauschens mit der Standardmeßanalyse nicht auswertbar sind (vgl. Kap. 5), können nach Anwendung der Kreuzkorrelation verwendet werden.

Analog zu den in Kap. 5 vorgestellten Auswertungen wird mit den Ergebnissen der Kreuzkorrelationen sämtlicher Geometrievariationen die Änderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und die Beurteilung der Fehlstellenausbildung analysiert.

Die direkt aus den Interpretationen des Geschwindigkeitsverlaufes gewonnenen Ergebnisse werden durch die Ergebnisse der Kreuzkorrelationen bestätigt (vgl. Kap. 5). Aus dem Verlauf der Kreuzkorrelationsfunktionen werden die Ergebnisse mit einem geringeren Auswertungsaufwand ermittelt.

Beispielhaft sind die Ergebnisse der Wellengeschwindigkeitsänderungen aus der direkten Auswertung des Meßsignals mit denen aus der Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktionen (KKF) für die sprungartigen Fehlstellen an Pfahl 3 gegenübergestellt (Abb. 7.10).

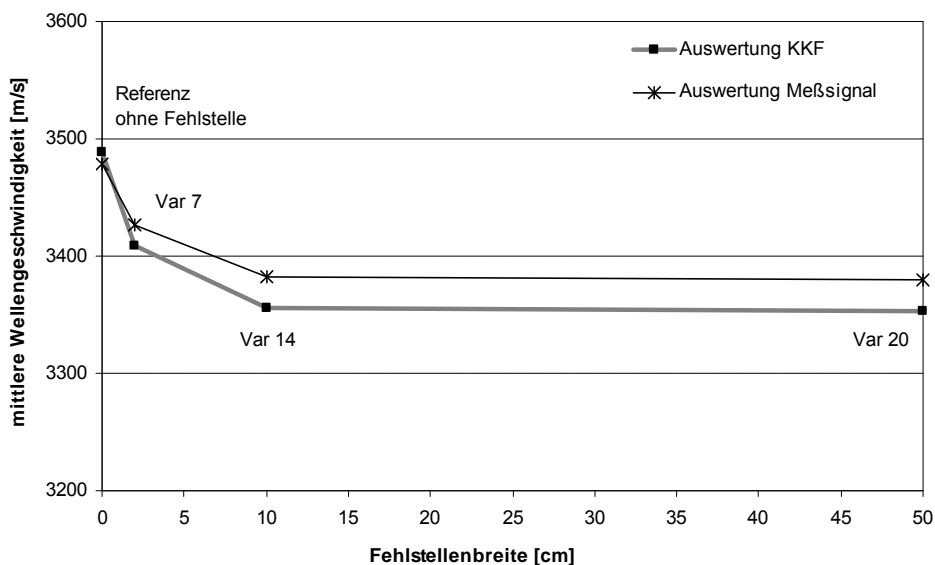


Abb. 7.10: Vergleich der direkten Auswertung des Meßsignals und der Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion zur Untersuchung der Wellengeschwindigkeitsänderungen anhand der Geometrievariationen von Pfahl 3

Es zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der bestimmten Wellengeschwindigkeiten. Wie bereits erläutert, kann zusätzlich mit Hilfe der Kreuzkorrelation die unterste DMS-Meßebebene ausgewertet werden. Die abschnittsweise ermittelten Wellengeschwindigkeiten im mittleren Bereich zwischen der obersten und untersten Meßebebene sind in Tab. 7.1 aufgelistet.

Tab. 7.1: Ermittelte Wellengeschwindigkeiten zwischen oberer und unterer DMS-Meßebebene

Pfahl 1	Wellengeschwindigkeit [m/s]	Pfahl 3	Wellengeschwindigkeit [m/s]
Referenz	3683	Referenz	3857
Var 10	3641	Var 7	3682
Var 13	3641	Var 14	3682

Die Wellengeschwindigkeitsreduktion im mittleren Fehlstellenbereich kann somit nachgewiesen werden.

Auch für die Untersuchungen zur Bestimmung der Fehlstellenausbildung stimmen die Ergebnisse überein. Als Beispiel sind die ermittelten Fehlstellenbreiten aus der direkten Auswertung des Meßsignals mit denen aus der Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktionen für die sprungartigen Fehlstellen an Pfahl 1 gegenübergestellt (Abb. 7.11).

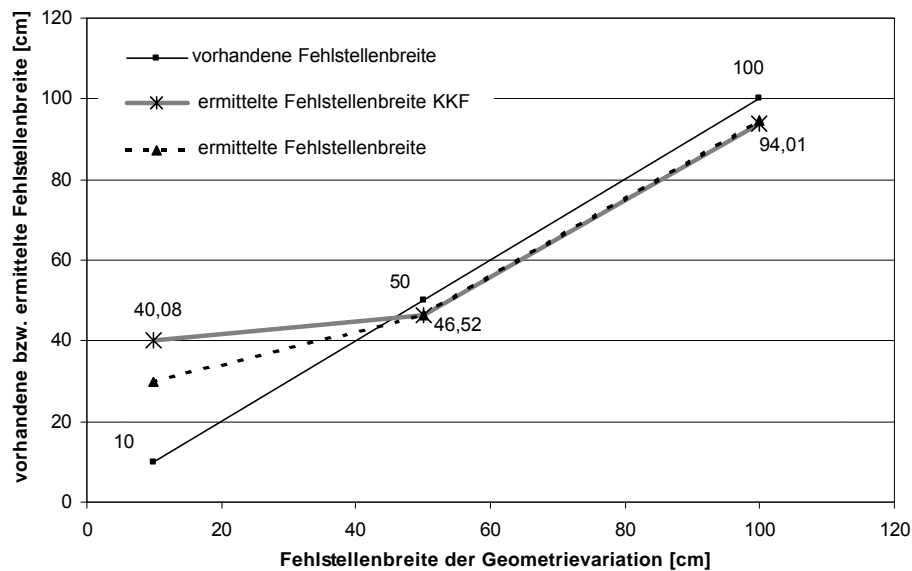


Abb. 7.11: Vergleich der direkten Auswertung des Meßsignals und der Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion zur Bestimmung der Fehlstellenbreite anhand der Geometrievariationen von Pfahl 1

7.2.5 Weiterführende Anwendungsmöglichkeiten durch Variation der Impulseinleitung bei der Integritätsprüfung

Bisher sind die Möglichkeiten der Auswertung mit einer Kreuzkorrelation von Geschwindigkeitsverläufen infolge einer Stoßwellenausbreitung vorgestellt worden. Die Zusammenhänge für die Vorgabe eines gezielten Stoßimpulses werden in Kap. 4 beschrieben. Der Frequenzgehalt eines Stoßimpulses ist durch die Grenzfrequenz begrenzt. Mit einem Stoßimpuls ist es nicht möglich, ein gezieltes Frequenzband einzuleiten. Dieses kann jedoch durch eine kurz andauernde Vibrationsbelastung mit einer Schwingfrequenz, die sich nach einer vorgegebenen Zeitfunktion verändert, realisiert werden. Dieser sogenannte Sweep wird häufig als Anregungsvorgang mit einem begrenzten Frequenzband bei dem geophysikalischen Vibroseis-Verfahren angewendet [58], [101].

Das klassische Sweep ist ein zwischen der Anfangsfrequenz f_1 und der Endfrequenz f_2 linear frequenzmoduliertes Sinus-Signal:

$$x(t) = A_0 \sin\left[2\pi\left(f_1 + \frac{\Delta f}{2J}t\right)t\right] \quad (7.9)$$

mit der Amplitude A_0 , der Dauer des Signals ϑ und der Bandbreite $\Delta f = f_2 - f_1$.

Wenn ein Sweep als Anregung verwendet wird, können die Laufzeiten nicht direkt aus dem Meßsignal, sondern erst nach der Auswertung mit einer Korrelation, bestimmt werden. Die Auflösungsmöglichkeiten des Korrelationssignals werden durch die in Gleichung (7.9) angegebenen Parameter bestimmt. Je größer die Bandbreite Δf und die Dauer ϑ sind, desto kürzer ist das Korrelationssignal. In Abb. 7.12 ist ein Beispiel für einen Sweep und sein Autokorrelationssignal gegeben.

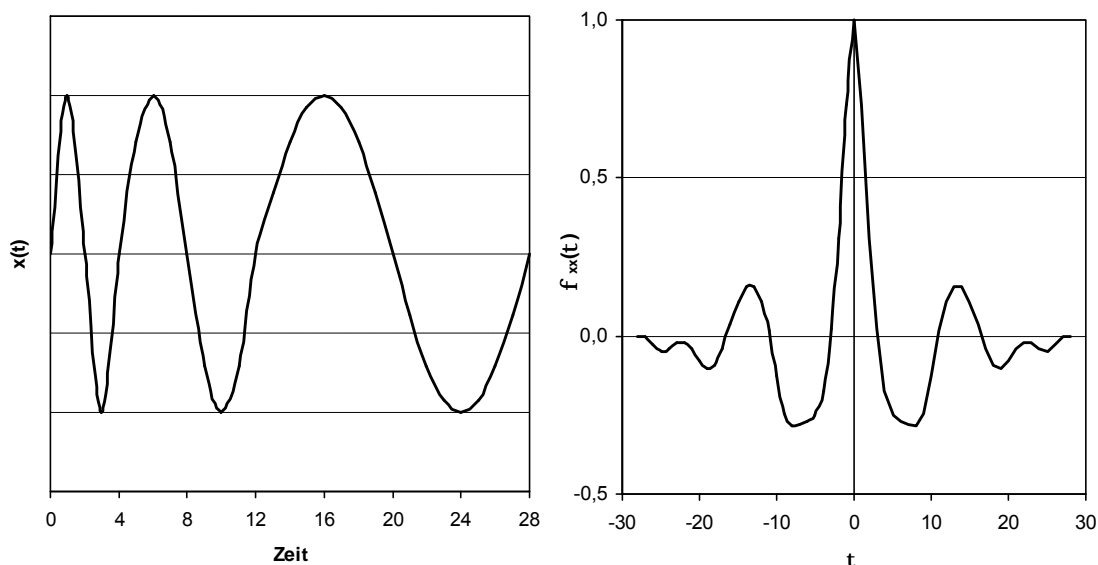


Abb. 7.12: Beispiel eines Sweeps sowie seiner Autokorrelationsfunktion

Die Anwendungsmöglichkeiten einer Anregung mit einem Sweep bei der Pfahlintegritätsprüfung gekoppelt mit einer Auswertung der Kreuzkorrelationsfunktion wird im Rahmen dieser Arbeit anhand von Simulationsberechnungen vorgestellt. Für die Simulationsberechnungen wird das in Kap. 3.3 erläuterte eindimensionale Modell verwendet. Das programmierte Berechnungsmodul wird durch die Vorgabemöglichkeit eines Anregungssweeps nach Gleichung (7.9) erweitert. Die Wahl der Elementgröße und des Zeitschritts erfolgt in Abhängigkeit der Endfrequenz f_2 nach den Gleichungen (3.27) und (3.39) mit 20 Elementen pro Wellenlänge.

Die Simulation der Wellenausbreitung in einem 10 m langen, zunächst unversehrten Pfahl mit einer Wellenausbreitungsgeschwindigkeit von $c_D = 3500$ m/s wird beispielhaft vorgestellt. Es werden hierbei Sweeps unterschiedlicher Bandbreite und Dauer untersucht. Der Kraftverlauf eines Sweeps der Dauer $\vartheta = 5$ ms sowie der Anfangsfrequenz $f_1 = 175$ Hz und der Endfrequenz $f_2 = 10000$ Hz ist Abb. 7.13 zu entnehmen.

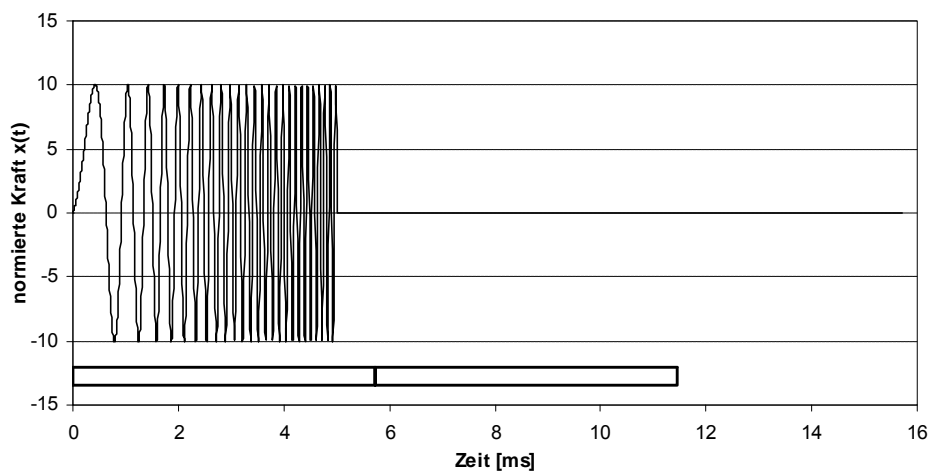


Abb. 7.13: Kraftverlauf $x(t)$ eines Sweeps mit $\vartheta = 5$ ms, $f_1 = 175$ Hz, $f_2 = 10000$ Hz

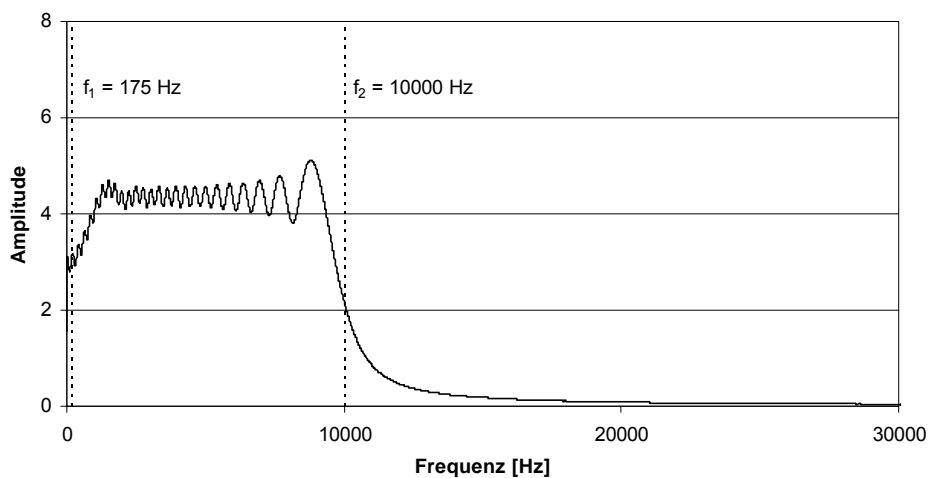


Abb. 7.14: Frequenzspektrum eines Sweeps mit $\vartheta = 5$ ms, $f_1 = 175$ Hz, $f_2 = 10000$ Hz

Die Frequenztransformation des Sweeps zeigt deutlich die Begrenzung des vorgegebenen Frequenzbandes (Abb. 7.14). Der resultierende Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf ist in Abb. 7.15 dargestellt. Eine direkte Auswertung dieses Signals ist nicht möglich.

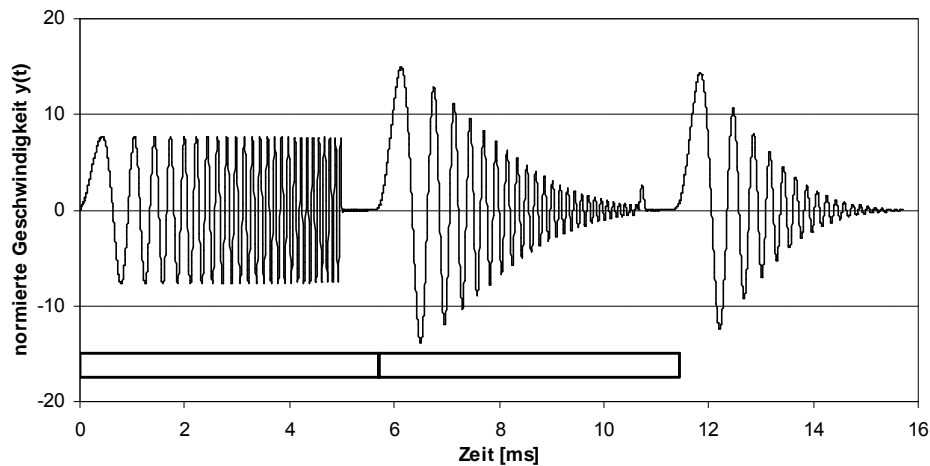


Abb. 7.15: Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ am Kopf eines unversehrten Pfahls infolge eines Sweeps (Simulation)

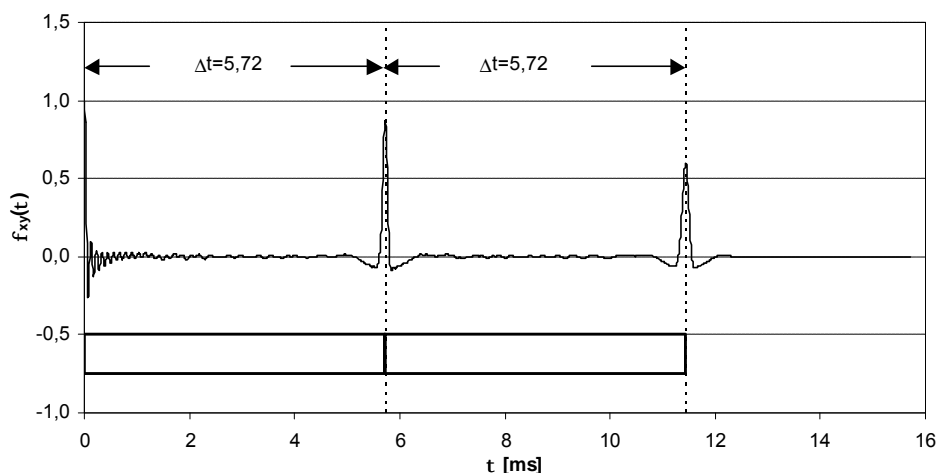


Abb. 7.16: Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{xy}(\tau)$ des unversehrten Pfahls

Erst durch die Kreuzkorrelation des Kraftverlaufes $x(t)$ mit dem Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ kann eine Auswertung erfolgen. Es ist eine sehr genaue Ermittlung der Laufzeitdifferenzen möglich. Aufgrund der großen Bandbreite Δf des Sweeps ist dessen Korrelationssignal sehr kurz und eindeutig bestimmbar.

Für die Simulation der Wellenausbreitung in einem Pfahl der gleichen Länge, aber mit einer sprungartigen Querschnittsreduzierung auf 50 % mit einer Fehlstellenbreite von einem Meter, können sowohl die Laufzeitdifferenzen der Pfahlfuß- als auch der Fehlstellenreflexionen genau ermittelt werden. Die Anregung erfolgt hierbei mit einem gleichen Sweep wie beim unversehrten Pfahl. Der resultierende Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 7.17 und das Ergebnis der Kreuzkorrelation in Abb. 7.18 abgebildet.

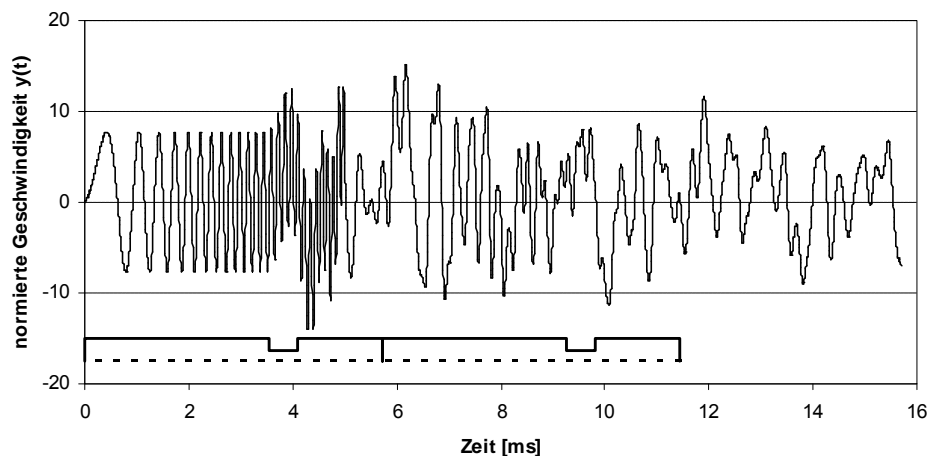


Abb. 7.15: Geschwindigkeitsverlauf $y(t)$ am Kopf eines Pfahls mit Fehlstelle infolge eines Sweeps (Simulation)

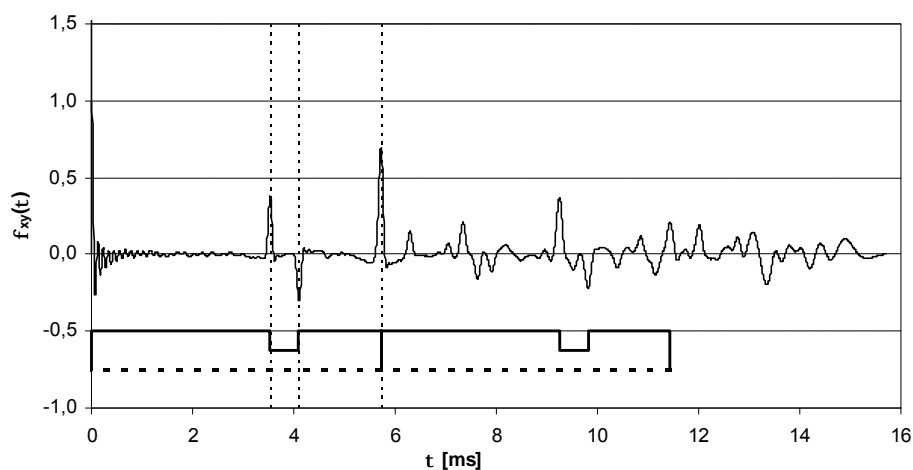


Abb. 7.16: Kreuzkorrelationsfunktion $\Phi_{xy}(\tau)$ des Pfahls mit Fehlstelle.

Die Simulationsberechnungen zeigen die Anwendbarkeit und die Vorteile einer Anregung mit einem Sweep. Die meßtechnische Umsetzung ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erfolgt.

7.2.6 Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendung der Kreuzkorrelation zur Auswertung der Geschwindigkeitsverläufe zeigt einige Vorteile bei der eindeutigen und direkten Bestimmung der Laufzeitdifferenzen gegenüber der unmittelbaren Auswertung des Meßsignals. Aufgrund der Eliminierung inkohärenter Signalanteile können lokale Maxima und Minima genau bestimmt werden. Diese lokalen Extrema sind so eindeutig, daß sie nicht nur bei der visuellen Interpretation,

sondern auch mit einem automatisierten Berechnungsalgorithmus bestimmt werden können. Diese Möglichkeit wird in Kap. 7.4 vorgestellt.

Nachteilig bei der Anwendung der Kreuzkorrelation ist, daß die Ordinaten der Maxima der Kreuzkorrelation keine direkten Rückschlüsse auf die Ordinaten der Maxima der Teilchengeschwindigkeit zulassen. Somit kann die Kreuzkorrelationsfunktion nicht zur Bestimmung der Fehlstellentiefe verwendet werden.

Mit Hilfe der Anregung eines Sweeps kann ein gezieltes Frequenzband vorgegeben werden. Die Anwendungsmöglichkeiten und Vorteile werden anhand von Simulationsberechnungen gezeigt.

7.3 Interpretation des Frequenzspektrums zur Auswertung von Integritätsmessungen

Zur Auswertung der Meßsignale wird bei den vorgestellten Analysen ausschließlich der Zeitbereich betrachtet. Im folgenden werden die Interpretationsmöglichkeiten des in den Frequenzbereich transformierten Meßsignals untersucht und bewertet.

7.3.1 Anwendungsmöglichkeiten zur Auswertung der Integritätsprüfung

Um eine Auswertung des Frequenzspektrums zu ermöglichen, ist eine Transformation des gemessenen Geschwindigkeitsverlaufs im Zeitbereich erforderlich. Zur Frequenztransformation wird im Rahmen dieser Arbeit eine Fouriertransformation verwendet.

Mit der Fourier-Reihenentwicklung lassen sich periodische Funktionen durch ein diskretes Spektrum exponentieller Funktionen darstellen [87]. Da die zu transformierenden Meßwerte an diskreten Zeitpunkten vorliegen, ist eine diskrete Formulierung erforderlich. Angewendet wird eine diskrete, komplexe Fouriertransformation (Fast-Fourier-Transformation, FFT) [27]. Für eine Meßreihe y mit n Werten gilt für die Fourierkoeffizienten c :

$$c_k = \sum_{j=0}^{n-1} y_j e^{-ijk \frac{2\pi}{n}} = \sum_{j=0}^{n-1} y_j w_n^{jk} \quad (k = 0, 1, \dots, n-1)$$

$$\text{mit } w_n = e^{-i \frac{2\pi}{n}} = \cos\left(\frac{2\pi}{n}\right) - i \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right). \quad (7.10)$$

Eine ausführliche Herleitung der Transformation ist z.B. in [87] gegeben.

Mit der FFT werden periodische Wellenanteile des Geschwindigkeitsverlaufs am Pfahlkopf bestimmt. Diese periodischen Anteile entstehen bei der Wellenausbreitung im Pfahl durch die wiederholten Reflektionen der Stoßwelle am Pfahlfuß und -kopf (Abb. 7.17).

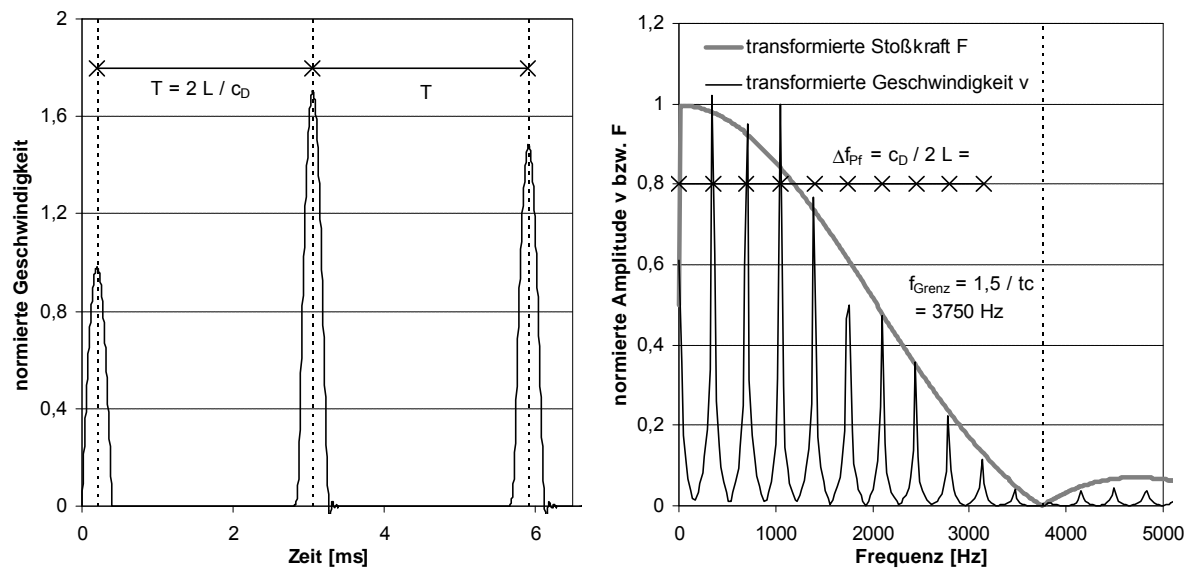


Abb. 7.17: Geschwindigkeitsverlauf und Frequenzspektrum bei einem unversehrten Pfahl

Die Stoßwelle erreicht nach der Laufzeit T wieder den Pfahlkopf. Der reziproke Wert von T tritt als periodischer Anteil mit der Frequenzdifferenz Δf_{Pf} bei der Transformation auf. Deutet man die entstehenden Frequenzpeaks als Resonanzen, können sie anhand der Eigenfrequenzbetrachtung eines Dehnstabes erklärt werden. Für den beidseitig frei gelagerten Dehnstab ergeben sich die Eigenfrequenzen in Abhängigkeit der Dehngeschwindigkeit c_D und der Stablänge L zu [65]:

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} = k \frac{c_D}{2L} \quad (7.11)$$

Die konstanten Differenzen zwischen den Eigenfrequenzen für $k = 1, 2, \dots$ entsprechen der Frequenzdifferenz Δf_{Pf} . Die größte angeregte Eigenfrequenz wird durch den Frequenzgehalt des Stoßimpulses bestimmt. Dieses wird in Abb. 7.17 durch die Gegenüberstellung des diskreten Geschwindigkeitsspektrums mit dem kontinuierlichen Stoßkraftspektrum verdeutlicht. Zur besseren Vergleichbarkeit sind die Verläufe anhand der Maxima normiert. Für den Fall der beidseitigen freien Lagerung gilt $f_1 = \Delta f_{Pf}$. Für geänderte Lagerungsbedingungen bleibt die Differenz Δf_{Pf} konstant, aber die Frequenzgröße ändert sich. Ergibt die Transformation eines Geschwindigkeitsverlaufs ein konstantes Δf_{Pf} , so kann auf eine unversehrte Pfahlgeometrie geschlossen werden. Aus der ersten Eigenfrequenz bzw. Resonanz können Rückschlüsse auf die Lagerungsbedingungen am Pfahlfuß abgeleitet werden.

Wenn Impedanzänderungen entlang der Pfalachse vorhanden sind, treten nicht nur Reflexionen am Pfahlfuß, sondern auch bei jeder weiteren Impedanzänderung auf (vgl. Kap. 3.1). Die Resonanz der an den Pfahlenden reflektierten Stoßwellenanteile wird durch die Resonanzen in Teilbereichen zwischen den weiteren Impedanzänderungen überlagert (Abb. 7.18).

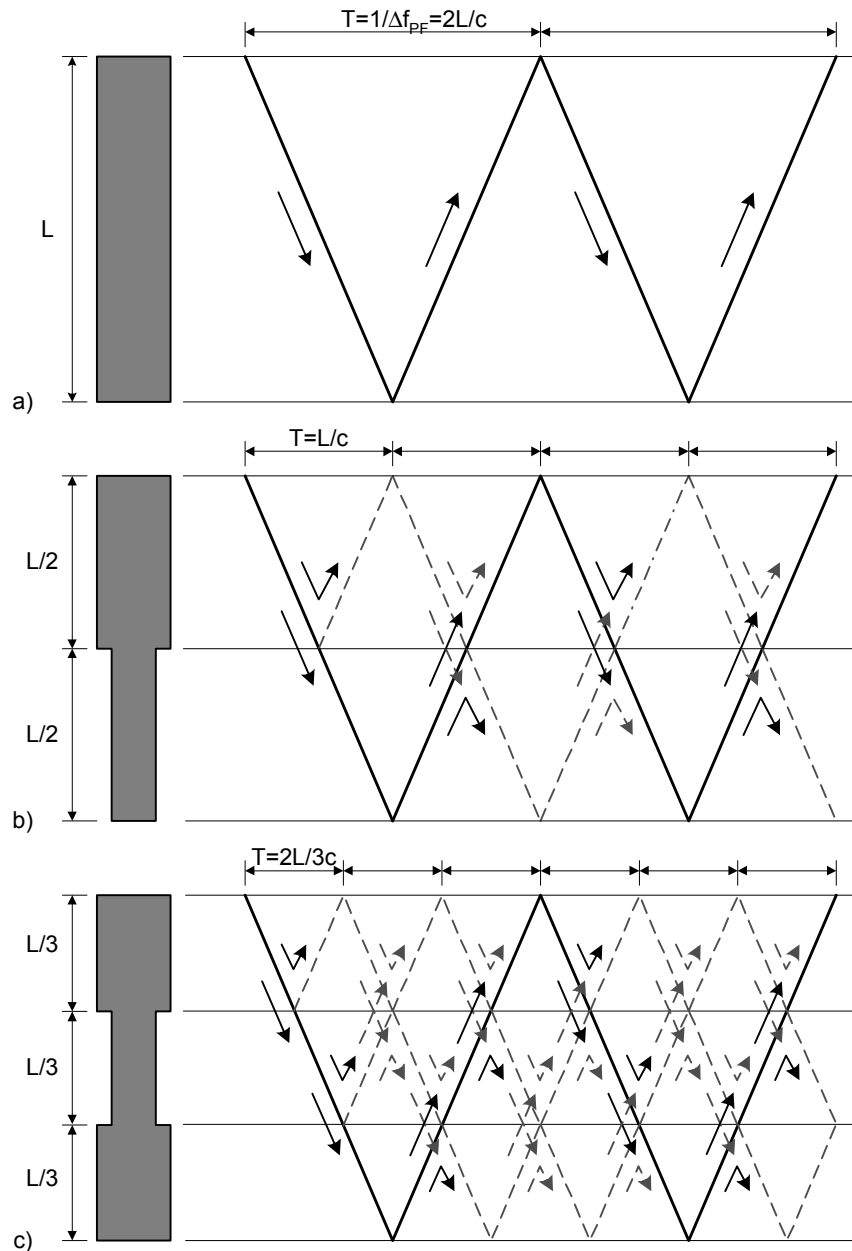


Abb. 7.18: Überlagerungen der Wellenanteile bei Impedanzänderungen entlang der Pfahlachse

Im Vergleich zum Spektrum des unversehrten Pfahls wirkt sich dieses auf das Frequenzspektrum des transformierten Geschwindigkeitsverlaufs am Pfahlkopf in Form von Verschiebungen der Frequenzpeaks aus. Zum einen ändert sich die absolute Größe der Frequenzen und zum anderen die relative Lage der Peaks untereinander. Somit ist die Frequenzdifferenz F nicht mehr konstant.

Diese Zusammenhänge sind auch die wesentlichen Erkenntnisse bisheriger Untersuchungen zur Interpretation des Frequenzspektrums [13], [79]. Hierbei wird mit der Frequenztransformation die Aussage anhand der Differenz Δf_{Pf} ermöglicht, ob ein Pfahl unversehrt ist oder Fehlstellen aufweist.

Bei einer Integritätsmessung wird eine Anzahl von n Meßwerten mit einem konstanten Zeitschritt erfaßt. Um den dynamischen Vorgang ausreichend abbilden zu können, ist wie in Kap. 4 erläutert ein möglichst kleiner Zeitschritt Δt erforderlich. Bei der FFT nach Gleichung (7.10) gilt für den Frequenzabstand Δf :

$$\Delta f = \frac{1}{\Delta t (n-1)} . \quad (7.12)$$

Um ein ausreichend kleinen Abstand Δf zu erzielen, ist bei kleinem Zeitschritt Δt eine große Anzahl n an Meßwerten erforderlich. Für einen längeren Meßzeitraum ist der transiente Wellenausbreitungsvorgang im Pfahl abgeklungen. Die Dämpfung ist häufig so groß, daß nur ein Wellendurchgang, d.h. eine Periode, erfaßt wird. Für eine geringe Anzahl an Perioden geht das diskrete Geschwindigkeitsspektrum in ein kontinuierliches Spektrum über, und die Bestimmung der Frequenzabstände Δf_{Pf} wird stark erschwert. Um eine Auswertung im Frequenzbereich in diesem Fall zu verbessern, wird die Mobilitätsanalyse angewendet [24].

Hierbei werden der Geschwindigkeits- und der Stoßkraftverlauf für die Analyse herangezogen (Abb. 7.19). Beide Verläufe werden transformiert, und es wird der Quotient aus Geschwindigkeits- und Stoßkraftamplitude berechnet (Abb. 7.20). Der kontinuierliche Anteil des Geschwindigkeitsspektrums, der auch im Stoßkraftspektrum enthalten ist, wird dadurch eliminiert. Zur Auswertung wird dann das diskrete Spektrum des Quotienten verwendet.

Bei dem dargestellten Simulationsbeispiel liegt eine beidseitig freie Lagerung des Pfahls vor. Wie erläutert bewirkt eine steifere Pfahlfußauflagerung eine Verringerung der Resonanzen, und für den Quotienten v / F ergibt sich eine Anfangssteigung im Amplitudenspektrum (vgl. Abb. 2.4). Aus dieser Anfangssteigung können entsprechend der Auswertung der Vibrationsmethode (vgl. Kap. 2.3) Aussagen über die Steifigkeit der Pfahlfußauflagerung abgeleitet werden, die aber für die Auswertung der Integrität nicht von Interesse sind. Die Frequenzdifferenz Δf_{Pf} des Amplitudenspektrums ermöglicht ebenfalls die Aussage, ob ein Pfahl unversehrt ist oder Fehlstellen aufweist. Weiterhin können durch den Vergleich der theoretischen mit der gemessenen mittleren Admittanz Aussagen abgeleitet werden (vgl. Kap. 2.3), ob ein Pfahldefekt vorliegt.

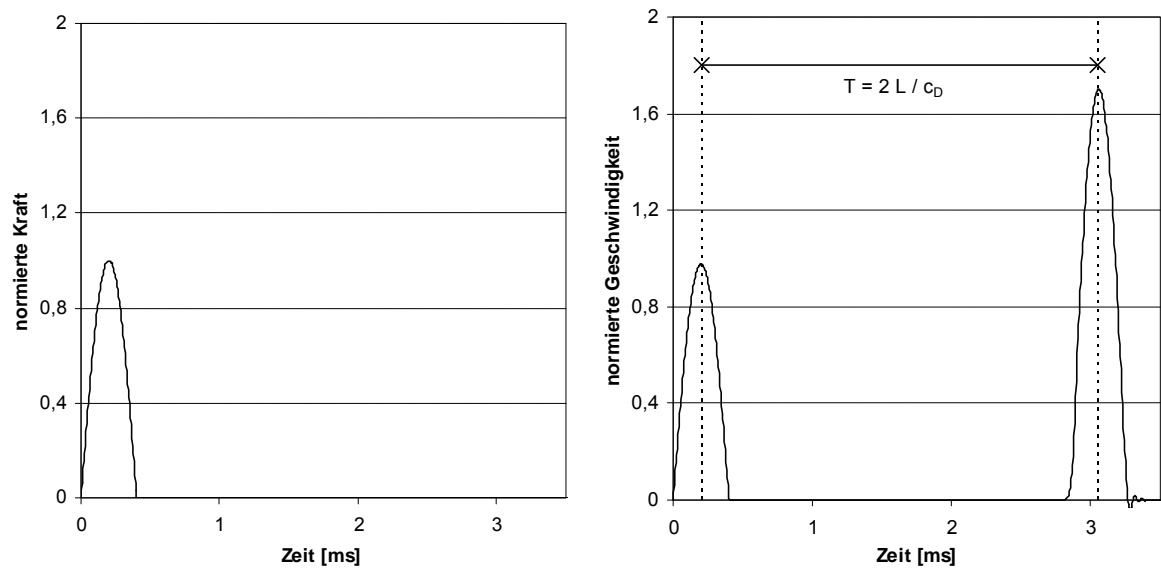


Abb. 7.19: Stoßkraft- und Geschwindigkeitsverlauf für die Mobilitätsanalyse

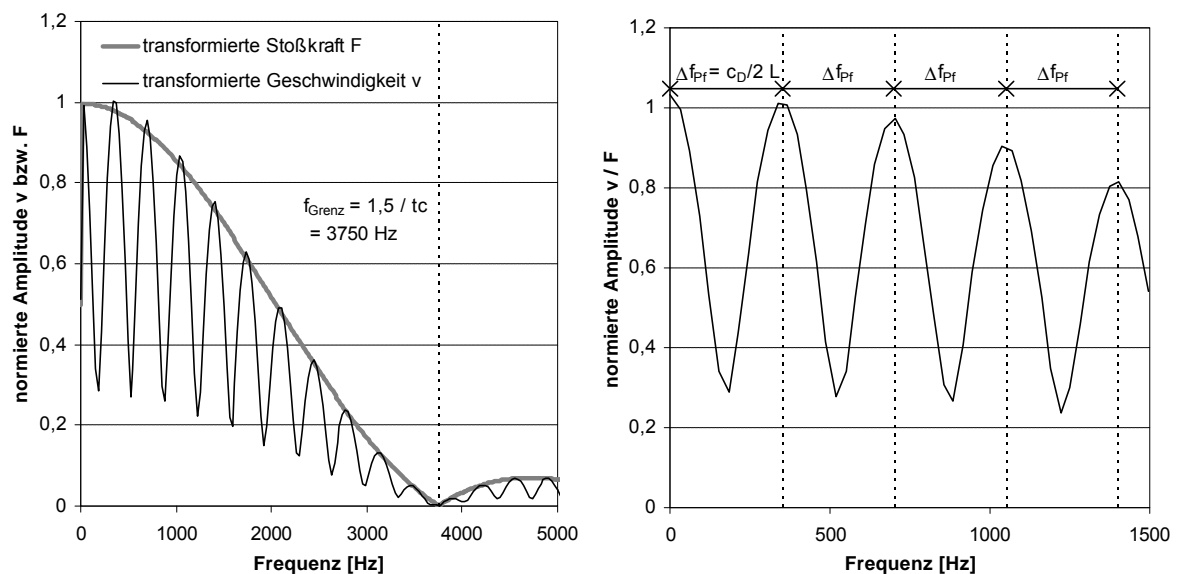


Abb. 7.20: Transformierter Stoßkraft- und Geschwindigkeitsverlauf sowie dessen Quotient

7.3.2 Auswertung der Testpfahlmessungen im Frequenzbereich

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen soll die Möglichkeit der Fehlstellenquantifizierung anhand der Auswertung des Frequenzspektrums analysiert werden. Es wird geprüft, inwiefern anhand der auftretenden Resonanzen Aussagen über die Lage der Fehlstelle entlang der Pfahlachse sowie die Breite und die Größe der Querschnittsreduzierung abgeleitet werden können.

Hierzu werden die Testpfahlmessungen herangezogen. Die Meßsignale werden mit der FFT transformiert, und anschließend werden die auftretenden Resonanzen ausgewertet. Um die Transformation zu ermöglichen, wird in das entwickelte Meßanalyseprogramm eine FFT implementiert (vgl. Kap. 4.1). Da aufgrund der geringen Länge der Testpfähle mehrere Wellendurchgänge bzw. Perioden erfaßt werden, kann auf eine Mobilitätsanalyse verzichtet werden.

Bei der Frequenzanalyse werden sämtliche Geometrievariationen betrachtet (vgl. Tab. 5.2). Repräsentativ werden einige Ergebnisse vorgestellt. Die resultierenden Spektren für die Referenzmessung am unversehrten Pfahl 3 und für die Messung der Geometrievariation 24 von Pfahl 3 sind in Abb. 7.21 dargestellt. Für die Querschnittsreduzierung auf 50 % mit einer Breite von einem Meter zeigt sich eine deutliche Änderung der Eigenfrequenzen gegenüber dem unversehrten Fall.

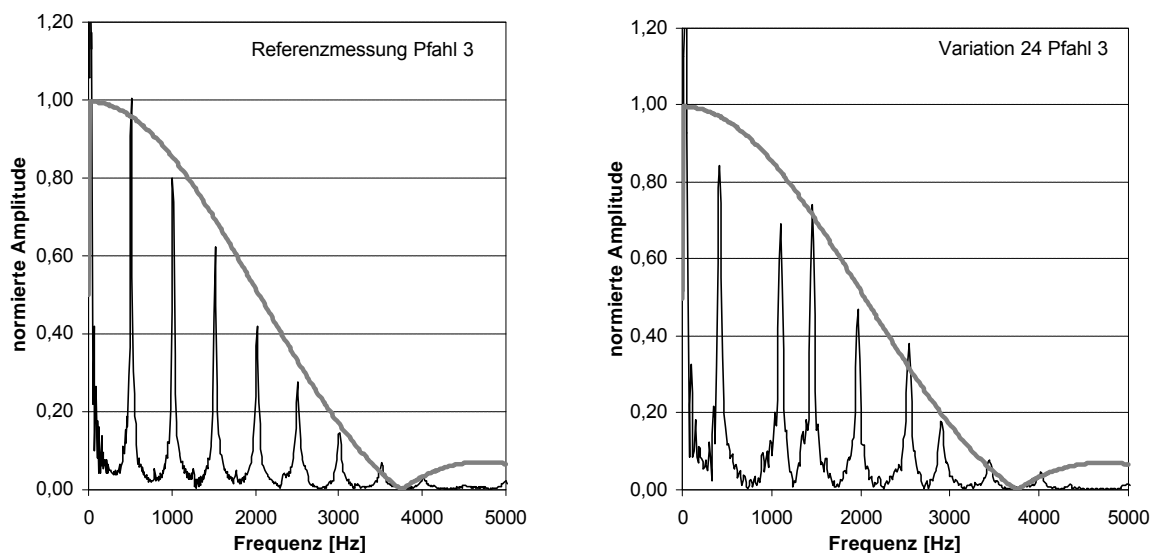


Abb. 7.21: Frequenzspektren für die Referenzmessung und für die Messung von Geometrievariation 24 von Pfahl 3

Um das Auflösungsvermögen kleiner Fehlstellen zu untersuchen, werden bei den Testpfahlmessungen die Variationen 1 bis 10 betrachtet (vgl. Tab. 5.2). Es ist Tab. 7.2 zu entnehmen, inwiefern diese Geometrieänderungen bei der Frequenzauswertung erfaßt werden. Entsprechend der Auswertung der Fehlstellenreflexionen im Zeitbereich treten Änderungen der Eigenfrequenz erst ab der Variation 10 auf (vgl. Kap. 5.4.2).

Die Frequenzauswertung ergibt somit bezüglich der Fehlstellenauflösung keine verbesserten Ergebnisse.

Tab. 7.2: Vergleich der Eigenfrequenzen bei kleinen Pfahlfehlstellen an Pfahl 1

Pfahl 1		Eigenfrequenzen f_k [Hz]			
Geometrievariation		1	2	3	4
Referenz theoretisch nach Gleichung (7.11)			492	984	1476
Referenz		22	494	956	1450
1		22	494	956	1450
2		22	494	956	1450
8		22	494	956	1450
10		22	494	967	1439
Differenzen zum unversehrten Pfahl		Frequenzdifferenzen Df_k [Hz]			
1		0	0	0	0
2		0	0	0	0
8		0	0	0	0
10		0	0	-11	11

Tab. 7.3: Vergleich der Eigenfrequenzen sprungartiger Fehlstellen an Pfahl 3

Pfahl3		Eigenfrequenzen f_k [Hz]			
Variation	Breite [cm]	1	2	3	4
Referenz	0	22	516	1010	1516
Var07	2	33	494	1011	1461
Var14	10	44	483	1010	1450
Var20	50	22	450	1066	1395
Var24	100	33	418	1099	1461
Differenzen zum unversehrten Pfahl		Frequenzdifferenzen Df_k [Hz]			
Var07	2	-11	22	-1	55
Var14	10	-22	33	0	66
Var20	50	0	66	-56	121
Var24	100	-11	98	-89	55

Bei größeren Fehlstellen treten signifikante Änderungen der Eigenfrequenzen auf. Die Eigenfrequenzen für die sprungartigen Fehlstellenvariationen an Pfahl 3 sind in Tab. 7.3

angegeben. Anhand der Änderungen kann festgestellt werden, daß eine Fehlstelle vorliegt. Aussagen zur Fehlstellenausbildung sind jedoch nicht eindeutig möglich.

Zur Analyse der Zusammenhänge werden Simulationsberechnungen mit dem in Kap. 3.3 beschriebenen, eindimensionalen Berechnungsmodell durchgeführt. Hierbei erfolgt keine Lösung der Bewegungsgleichung (3.33) im Zeitbereich mit anschließender Transformation in den Frequenzbereich, sondern eine direkte Bestimmung der Eigenfrequenzen mit der Modalanalyse (vgl. Kap. 3.3.2).

Im folgenden werden daher nicht die Amplitudenspektren, sondern die resultierenden Werte der Eigenfrequenzen betrachtet. Bei der Anwendung der FFT zur Transformation der gemessenen Signale wird außerdem festgestellt, daß eine eindeutige quantitative Bestimmung der Amplitudengrößen aus den Spektren bei dem vorliegenden transienten Vorgang nicht möglich ist.

Die Zusammenhänge zwischen der Wellenausbreitung und den Eigenfrequenzen wird für den unversehrten Pfahl in Abb. 7.17 erläutert. Wenn Fehlstellen vorhanden sind, so ändert sich die Eigenfrequenz des Pfahlsystems. Zur Verdeutlichung der Auswirkungen dient die Simulationsberechnung für einen Pfahl mit einer Länge von $L = 5$ m und einem Durchmesser von 0,4 m. Neben dem unversehrten Pfahl wird eine sprungartige Vergrößerung und Verkleinerung der Querschnittsfläche auf 50 % betrachtet. Die Lage des Sprungs wird mit einem Abstand von $0,25 L$, $0,50 L$ und $0,75 L$ unterhalb des Pfahlkopfs vorgegeben. Die Querschnittsfläche bleibt ab dem Sprung bis zum Pfahlfuß konstant (Abb. 7.22).

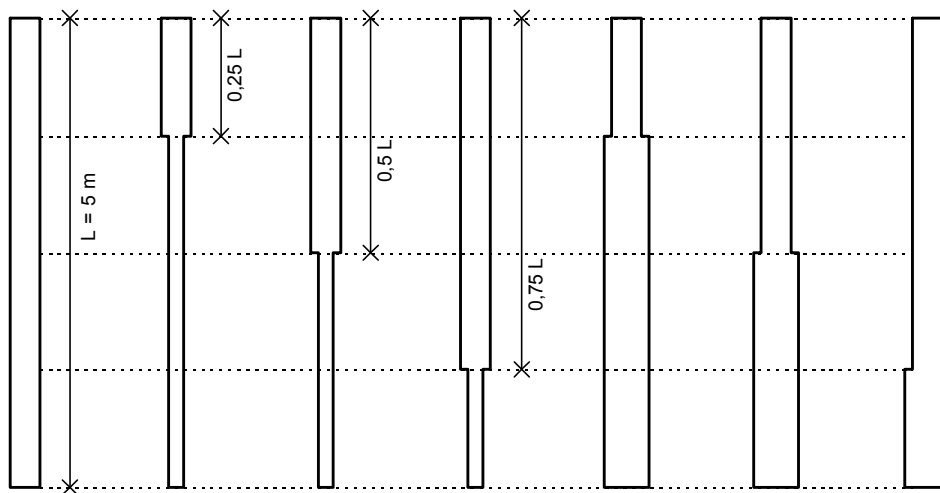


Abb. 7.22: Verwendete Pfahlgeometrien bei dem Simulationsbeispiel

Zur Analyse der entstehenden Eigenfrequenzen werden zunächst die Resonanzen der reflektierten Wellenanteile der einzelnen Pfahlabschnitte nach Gleichung (7.11) berechnet (Tab. 7.4). Aufgrund der symmetrischen Variation der Lage des Querschnittssprungs sind die Resonanzen der Abschnitte teilweise identisch mit denen der Gesamtlänge.

Tab. 7.4: Resonanzen der Pfahlabschnitte

		Eigenfrequenz f_k [Hz]			
	DI [m]	1	2	3	4
1,00 L	5,00	350	700	1050	1400
0,75 L	3,75	467	934	1401	1868
0,50 L	2,50	700	1400	2100	2800
0,25 L	1,25	1400	2800	4200	5600

Tab. 7.5: Vergleich der Eigenfrequenzen

Fehlstelle		Eigenfrequenzen f_k [Hz]			
Querschnittsänderung	Lage	1	2	3	4
keine		350	700	1050	1400
Vergrößerung	0,25 L	387	700	1013	1400
Verkleinerung	0,25 L	313	700	1087	1400
Vergrößerung	0,5 L	350	700	1050	1400
Verkleinerung	0,5 L	350	700	1050	1400
Vergrößerung	0,75 L	313	700	1087	1400
Verkleinerung	0,75 L	387	700	1013	1400
Differenzen zum unversehrten Fall		Frequenzdifferenzen Df_k [Hz]			
Vergrößerung	0,25 L	-37	0	37	0
Verkleinerung	0,25 L	37	0	-37	0
Vergrößerung	0,5 L	0	0	0	0
Verkleinerung	0,5 L	0	0	0	0
Vergrößerung	0,75 L	37	0	-37	0
Verkleinerung	0,75 L	-37	0	37	0

Die berechneten Eigenfrequenzen der betrachteten Fehlstellenvariationen sind in Tab. 7.5 angegeben. Sind die Resonanzen der Gesamtlänge mit denen der Abschnitte identisch, bleiben diese für das Gesamtsystem erhalten. Für den Querschnittswechsel in Pfahlmitte sind keine Änderungen der Eigenfrequenzen festzustellen. Bei den Sprüngen in den Abständen von 0,25 L und 0,75 L vom Pfahlkopf resultieren symmetrische Änderungen der ersten und dritten Eigenfrequenz. Die gleichen Änderungen entstehen aber zum einen durch

die unterschiedliche Lage sowie zum andern durch die Querschnittsvergrößerung und -verkleinerung. Unterschiedliche Einflüsse haben somit identische oder keine Auswirkungen auf die Eigenfrequenzen.

Auch wenn derartige symmetrische Bedingungen bei Pfählen in situ im allgemeinen nicht auftreten, zeigt sich, daß eindeutige Rückschlüsse aus der Auswertung der Frequenztransformation auf die Ausbildung von Pfahlfehlstellen nicht möglich sind.

7.3.2 Bewertung der Auswertungsmöglichkeiten mit einer Frequenztransformation

Die vorgestellten Auswertungen der Testpfahlmessungen und die Simulationsberechnungen zeigen, daß mit der Frequenztransformation des Geschwindigkeitsverlaufs am Pfahlkopf nur festgestellt werden kann, ob ein Fehlstelle vorhanden ist oder der Pfahl unversehrt ist.

Die Auswirkungen der Fehlstellenbreite, der Lage und die Größe der Querschnittsreduzierung auf das Frequenzspektrum können abgeleitet werden. Aussagen über die Fehlstellenausbildung anhand des Frequenzspektrum sind im Rückschluß aber nicht eindeutig möglich.

Im Vergleich zur Auswertung im Zeitbereich können mit der Frequenzauswertung sowie der Mobilitätsanalyse keine weiterführenden Erkenntnisse gewonnen werden. Für die Anwendung auf Körper kleiner Ausdehnungen verhält sich dieses anders. Bei der Anwendung der Impact-Echo-Methode stellt sich hierbei ein Schwingungsvorgang ein (vgl. Abb. 3.1) [86]. Durch die geringen Auswirkungen der Dämpfung bei den kleinen Laufstrecken der Welle sind Perioden erfaßbar. Die sehr kleinen Laufzeitdifferenzen T können im Zeitbereich nur schwer bestimmt werden. Daher wird zur Auswertung derartiger Messungen die Frequenztransformation verwendet.

7.4 Identifikationsberechnungen zur Auswertung von Integritätsmessungen

Die bisher vorgestellten Auswertungen basieren auf der Interpretation des Meßsignals im Zeit- oder Frequenzbereich. Zur Verbesserung der Beurteilungsmöglichkeiten werden verschiedene Methoden der Analyse des Meßsignals vorgestellt. Es zeigt sich, daß eine Differenzierung sämtlicher Einflußfaktoren auf den resultierenden Geschwindigkeitsverlauf bei der Pfahlintegritätsprüfung komplex ist. Bei Untersuchungen des Bodeneinflusses (vgl. Kap. 6) werden Simulationsberechnungen durchgeführt. Hierbei wird das Berechnungsmodell im Rahmen von Parametervariationen schrittweise so angepaßt, daß gemessener und simulierter Geschwindigkeitsverlauf näherungsweise übereinstimmen. Zur weiterführenden, automatisierten Auswertung werden die Möglichkeiten einer Meßsignalidentifikation untersucht.

7.4.1 Einordnung der Meßsignalidentifikation

Zunächst erfolgt eine Einordnung der Systemidentifikation für die vorliegende Problematik der Pfahlintegritätsprüfung. Die Betrachtung des elastomechanischen Pfahl-Boden-Systems kann als Strukturproblem betrachtet werden [62]. In diesem System wird die Wellenausbreitung durch einen Stoßimpuls als Eingangsgröße bzw. Einwirkung angeregt. Als Ausgangsgröße, d.h. als Auswirkung, wird bei der Integritätsprüfung die Beschleunigung am Pfahlkopf gemessen. Ziel der Untersuchung ist die Schadenserkenkung, d.h. die Systembeschreibung, um Aussagen über die Pfahllänge und die Beschaffenheit des Pfahlschafts zu erhalten. Somit liegt kein direktes Strukturproblem vor, bei dem die Eingangsgrößen sowie die Systembeschreibung gegeben sind und Ausgangsgrößen gesucht werden, sondern ein inverses Problem [67]. Bei inversen Strukturproblemen sind Entwurfs-, Eingangs- und Identifikationsprobleme zu unterscheiden [62]. Bei der vorliegenden Problematik sind die Eingangs- sowie Ausgangsgrößen durch Messung bekannt und die Systembeschreibung wird gesucht. Somit handelt es sich um ein Identifikationsproblem [66]. Die Aufgabenstellung der Identifikation ist es, mit Hilfe der vorhandenen Eingangs- und Ausgangsgrößen ein Ersatzsystem bzw. Modell zu ermitteln, das hinsichtlich festzulegender Kriterien und innerhalb gewisser Fehlergrenzen dem realen System entspricht [37]. In den letzten Jahren wurden verstärkt modellgestützte Identifikationsverfahren zur Schadensdetektion bei mechanischen Systemen entwickelt [64].

Entsprechend der Aufgabenstellung der Identifikation sind verschiedene Anforderungen an das Modell zu stellen. Zu unterscheiden sind dabei qualitative und quantitative Modelle [62]. Wenn eine direkte Zuordnung von Ein- und Ausgangsgrößen wie im vorliegenden Fall erforderlich ist, muß ein quantitatives Modell verwendet werden.

Bei der Identifikation sind die parametrische und die nichtparametrische Identifikation zu differenzieren [61]. Bei der hier behandelten Problematik kann das dynamische Verhalten durch ein Strukturmodell mit explizit auftretenden Parametern erfaßt werden. Somit ist eine parametrische Identifikation zu betrachten.

Bei den Verfahren zur Identifikation werden drei Modelle unterschieden [63]. Das inverse Modell bildet aus den Ausgangsgrößen die Eingangsgrößen. Dies entspricht für die vorliegende Problematik nicht der Zielsetzung. Bei dem verallgemeinerten Modell erfolgt eine Aufteilung in Teilmodelle. Da Pfahl und Boden als ein System auf äußere Einwirkungen reagieren, ist dieses Modell ebenfalls nicht praktikabel. Ziel ist es, ein Modell zu entwickeln, das möglichst genau das Verhalten des realen Systems wiedergibt. Dieses wird als Vorwärtsmodell bezeichnet (Abb. 7.23).

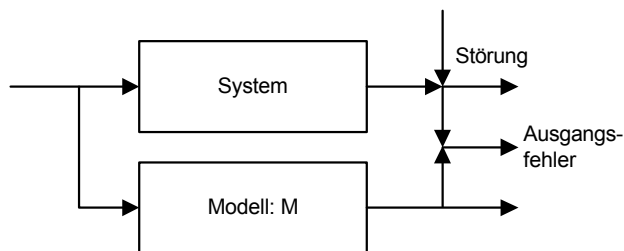


Abb.7.23: Identifikation mit einem Vorwärtsmodell [62]

Für die dynamische Pfahlprüfung zur Bestimmung der Tragfähigkeit existieren Identifikationsalgorithmen [49]. Diese können für die vorliegende Problematik der Integritätsbestimmung jedoch nicht verwendet werden. Bei diesen Algorithmen werden die auftretenden großen Verschiebungen zwischen Pfahl und Boden bzw. der Widerstand gegen solche Verschiebungen herangezogen, um Aussagen über das Last-Verformungsverhalten zu ermöglichen.

Ein Überblick über die Anwendungen von Identifikationsverfahren bei Stoßprüfungen wird in [9] vorgestellt. Hierbei wird im wesentlichen die Impact-Echo-Methode betrachtet [86] [94].

7.4.2 Entwicklung und Anwendung einer Meßsignalidentifikation

Entsprechend der erläuterten Einordnung ist für die Meßsignalidentifikation zur Auswertung von Integritätsprüfungen eine parametrische Identifikation eines Vorwärtsmodells relevant.

Zur Entwicklung eines geeigneten Algorithmus sind weitere Rahmenbedingungen zu diskutieren. In Anlehnung an die Definition für schlecht gestellte Probleme [55] bestehen wesentliche Fragestellungen bei der Entwicklung einer Identifikation zum einen darin, in wieweit der Informationsgehalt der Meßdaten ausreicht, um eine eindeutige Aussage zu erhalten. Zum anderen muß geprüft werden, ob kleine Störungen in den Meßdaten auch nur kleine Störungen in der Lösung erzeugen [25].

Übertragen auf die Integritätsprüfung läßt sich feststellen, daß der zur Verfügung stehende Informationsgehalt der Meßdaten bei der Standarddurchführung nur gering ist. In Kap. 4.4 wird die Möglichkeit der Erweiterung der Meßkette mit zusätzlichen DMS-Aufnehmern vorgestellt. Jedoch kann diese Erweiterung nur für ausgewählte Pfähle und nicht bei der Standardmessung verwendet werden. Daher muß eine Identifikation betrachtet werden, die

mit dem geringen Informationsgehalt der Meßdaten eine akzeptable Aussage liefert. Zusätzlich zu den Meßdaten sind weitere Informationen durch Herstellungsprotokolle gegeben. Hieraus können Sollwerte für die Pfahlgeometrie und Materialeigenschaften abgeleitet werden. Wie in Kap. 6 vorgestellt, können aus den Daten der Baugrunderkundung Anhaltswerte für den Bodeneinfluß auf die Wellenausbreitung im Pfahl gewonnen werden.

Anhand der Testpfahlmessungen werden in den Kap. 4 und 5 die meßtechnischen Störeinflüsse auf den Geschwindigkeitsverlauf am Pfahlkopf aufgezeigt. Bereits diese Störeinflüsse können die direkte Interpretation des Meßsignals erheblich erschweren. Für die Identifikation muß gewährleistet sein, daß derartige Störsignale nicht große Störungen in der Lösung erzeugen. Eine Möglichkeit der Elimination inkohärenter Signalanteile wird in Kap. 7.2 mit der Kreuzkorrelation gefunden.

Für die Meßsignalidentifikation muß also ein Vorwärtsmodell verwendet werden, das unter Vorgabe einer Anfangsmodellierung durch die zur Verfügung stehenden Sollwerte der Geometrie- und Materialeigenschaften zunächst die Wellenausbreitung im ungestörten, realen System beschreiben kann. Bei Änderung des Systemverhaltens, z.B. bei signifikanten Reflexionen infolge einer Fehlstelle, muß das Modell als falsch erkannt werden und die Fehlstelle lokalisiert werden. Das fehlerhafte Modell muß durch die Meßdaten verbessert werden. Zur Korrektur des Modells müssen unter Berücksichtigung meßtechnischer Störeinflüsse Parameterschätzverfahren verwendet werden [15], [16]. Hierdurch sollen Rückschlüsse auf die Ausbildung einer Fehlstelle und ihre Lage möglich werden.

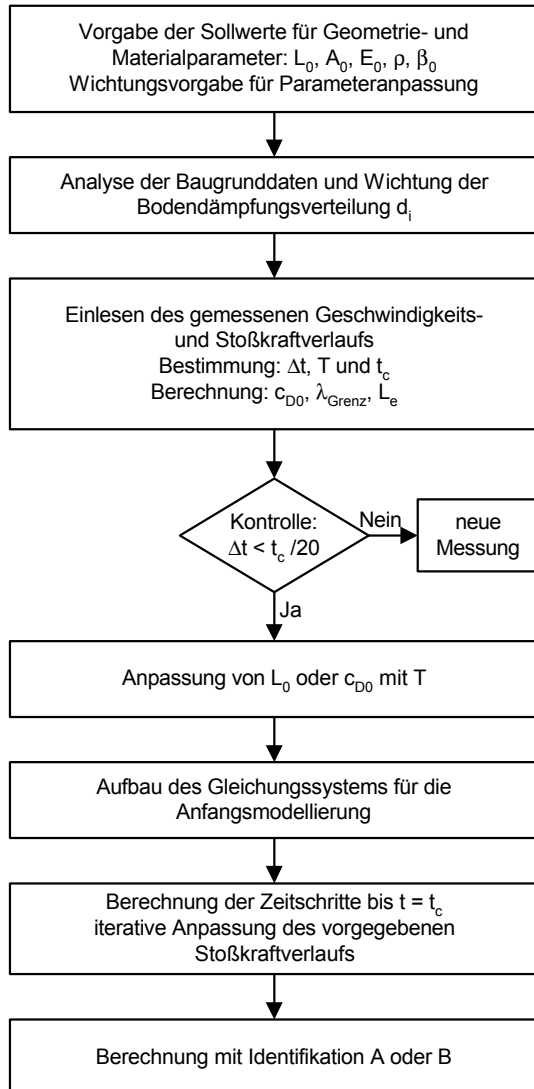
Zur Simulation des direkten Strukturproblems werden in Kap. 3.3 die Grundlagen des eindimensionalen Modells auf Basis der FEM beschrieben. Die Anwendbarkeit dieses Modells zur Simulation des realistischen Stoßwellenausbreitungsprozesses im Pfahl wird in den Kap. 5 und 6 gezeigt. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen bestimmten mehrdimensionalen Effekte können mit dem eindimensionalen Modell nicht abgebildet werden. Die Ergebnisse aus Kap. 6 über den Bodeneinfluß bei in situ Messungen haben gezeigt, daß für die Standardmessungen diese Effekte oft nur schwer erfaßbar sind. Für den im Normalfall zur Verfügung stehenden Informationsgehalt können alle relevanten Einflußgrößen auf die Wellenausbreitung zunächst ausreichend mit dem eindimensionalen Modell abgebildet werden. Daher wird auch bei der Meßsignalidentifikation das eindimensionale FE-Modell zugrunde gelegt.

Für die Simulationsberechnungen wird ein mit dem Programmsystem ANSYS erstelltes Berechnungsmodul verwendet. Dieses Modul kann für die Entwicklung einer Meßsignalidentifikation jedoch nicht erweitert werden. Daher erfolgt für die Identifikation eine separate Programmierung. Entsprechend der in Kap. 3.3 erläuterten Grundlagen wird eine FE-Formulierung des mit Feder-Dämpfer-Elementen gekoppelten elastischen Dehnstabs aufgestellt. Zur Lösung der Bewegungsgleichung im Zeitbereich wird ebenfalls das Zeitintegrationsverfahren nach Newmark verwendet.

Aufbauend auf der FE-Formulierung wird ein Identifikationsalgorithmus zur Auswertung der Integritätsprüfung entwickelt, der eine quantitative Bewertung der Beschaffenheit des Pfahl-

schafts ermöglichen soll. Hierzu werden zwei Vorgehensweisen untersucht und bewertet.

Die Aufbereitung der Eingangsdaten für die Identifikationsberechnung ist daher für beide Vorgehensweisen identisch.



Aus den zur Verfügung stehenden Sollwerten wird eine Anfangsmodellierung erstellt. Der zugrunde liegende Ablauf ist in Abb. 7.24 skizziert.

Neben der Vorgabe der Sollwerte für die Pfahlgeometrie und Materialeigenschaften wird der gemessene Geschwindigkeits- und Stoßkraftverlauf eingelesen.

Die Sollwerte umfassen Vorgaben für die Pfahllänge L_0 , den Querschnitt A_0 , die Dichte ρ und den E-Modul E_0 . Der Dämpfungsparameter β_0 nach Gleichung (3.34) für das Pfahlmaterial wird zunächst zu Null gesetzt. Gleiches gilt für die Bodendämpfungsverteilung d_i . Entsprechend des in Kap. 6 beschriebenen Vorgehens kann eine Wichtung der Bodendämpfung entlang der Pfahlachse vorgegeben werden. Während des Identifikationsprozesses erfolgt eine Anpassung der Dämpfungsparameter.

Impedanzänderungen infolge der Pfahleigenschaften werden nach Gleichung (3.12) durch Änderungen der Querschnittsfläche oder der Materialeigenschaften bewirkt.

Abb. 7.24: Erstellung der Anfangsmodellierung

Für die Anpassung der Modellparameter bei auftretenden Impedanzänderungen wird die Querschnittsfläche als Geometrieparameter und der E-Modul als Materialeigenschaft herangezogen. Die Dichte wird für den Identifikationsprozeß konstant angenommen. Für die Parameteranpassung kann eine Wichtung der Einflußfaktoren vorgegeben werden. Für die Anwendung anhand der Testpfahlmessungen beschränkt sich die Anpassung zunächst auf die Querschnittsfläche.

Aus den Meßdaten werden weitere Daten für die Anfangsmodellierung gewonnen. Durch eine Extremwertbetrachtung werden die Impulsdauer t_c und die Laufzeitdifferenz T des ersten Wellendurchgangs bestimmt. Die Dehnwellengeschwindigkeit c_{D0} wird nach Gleichung

(3.6) berechnet. Resultierend aus t_c und c_{D0} wird die Grenzwellenlänge λ_{Grenz} nach Gleichung (3.27) ermittelt.

Voraussetzung für die Identifikationsberechnung ist ein ausreichend kleiner Zeitschritt Δt der gemessenen Signale. Der aus den Signalen bestimmte Zeitschritt wird nach den Gleichungen (3.39) und (3.40) anhand von λ_{Grenz} kontrolliert und für die Anfangsmodellierung verwendet. Die Wahl der Elementgröße L_e erfolgt nach Gleichung (3.40). Aus dem bei den meisten Messungen verwendeten Zeitschritt resultiert eine Elementgröße von 60 - 100 Elementen je Grenzwellenlänge.

Mit Hilfe der aus dem Meßsignal bestimmten Laufzeit T erfolgt nach Gleichung (5.1) wahlweise die Anpassung von L_0 oder von c_{D0} . Die Anpassung der Wellengeschwindigkeit erfolgt über die Änderung von E_0 .

Wenn sämtliche Modellparameter für die Anfangsmodellierung festgelegt sind, wird das Gleichungssystem gemäß Gleichung (3.33) aufgebaut. Die Vorgabe der Belastungsfunktion erfolgt durch den gemessenen Stoßkraftverlauf. Damit der Kraftgrößenverlauf mit der resultierenden, gemessenen Geschwindigkeit übereinstimmt, erfolgt eine iterative Anpassung der Maximalwerte durch die Berechnung bis zum Zeitschritt $t = t_c$.

Nach der Bestimmung der Belastungsfunktion ist die Anfangsmodellierung abgeschlossen, und es beginnt der Identifikationsprozeß, der sich für die beiden untersuchten Vorgehensweisen unterscheidet.

7.4.2.1 Identifikationsalgorithmus A

Die Zielsetzung des Identifikationsalgorithmus A ist eine möglichst gute Anpassung des berechneten an den gemessenen Geschwindigkeitsverlauf. Der Berechnungsablauf wird in Abb. 7.25 vorgestellt. Aufbauend auf der Anfangsmodellierung erfolgt eine Aufteilung des Pfahls in Segmente gleicher Geometrie- und Materialeigenschaften. Die Parameter werden bei der Identifikation nicht elementweise, sondern über die wählbare Segmentgröße S konstant verändert. Die minimale Segmentgröße wird durch die Elementgröße L_e begrenzt.

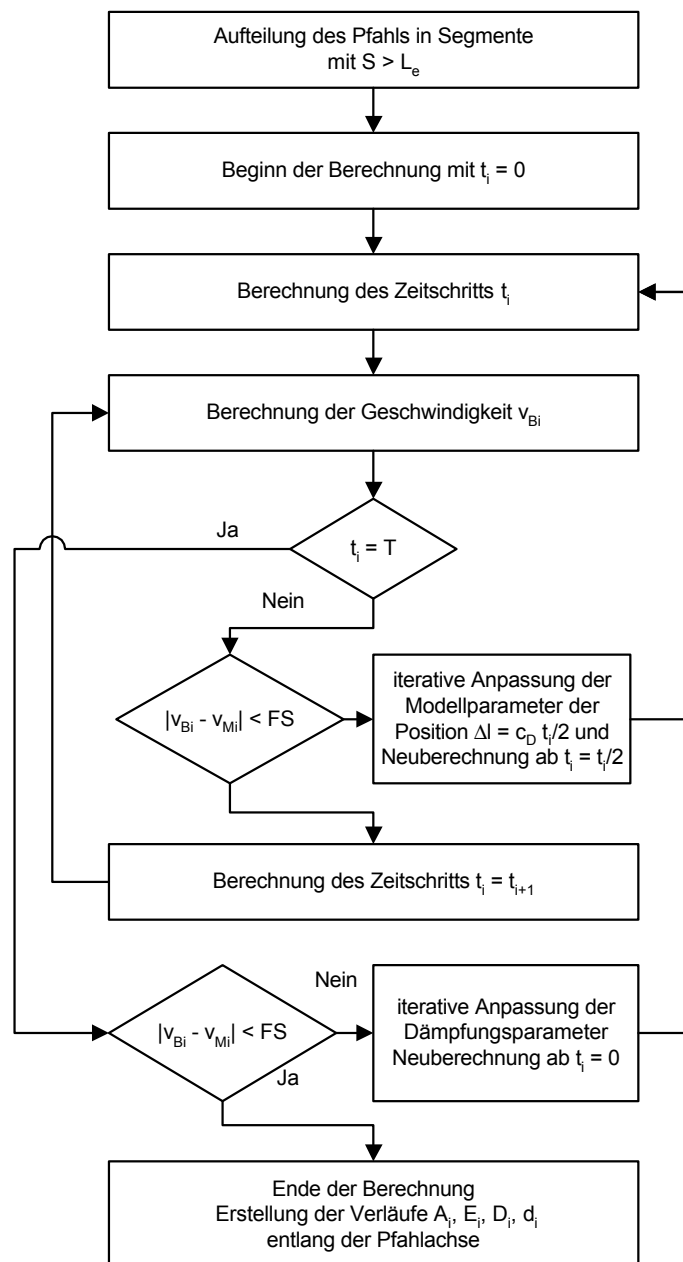


Abb. 7.25: Ablauf des Identifikationsalgorithmus A

Die Berechnung erfolgt zeitschrittweise. Nach jedem Zeitschritt t_i wird die gemessene mit der berechneten Teilchengeschwindigkeit v_i mit einer definierten Fehlerschranke FS verglichen. Die Größe von FS muß bei dem Algorithmus A in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsverlaufs vorgegeben werden. Bei Überschreitung von FS erfolgt eine iterative Anpassung der Modellparameter. Wird die Fehlerschranke zum Zeitpunkt t_i überschritten, müssen die Modellparameter in dem Segment angepaßt werden, das im korrespondierenden Abstand vom Pfahlkopf $\Delta l = c_D t_i / 2$ liegt (Abb. 7.26).

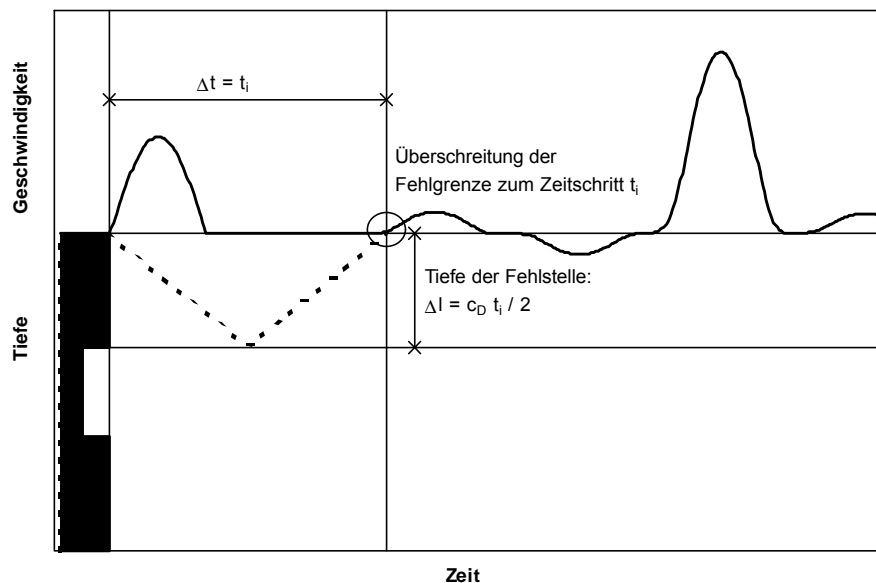


Abb. 7.26: Anpassung der Modellparameter zum Zeitpunkt t_i

Die Parameter der Segmente werden nacheinander iterativ so angepaßt, daß der gemessene und der berechnete Geschwindigkeitsverlauf im Rahmen der Fehlertoleranz übereinstimmen. Abweichungen der Geschwindigkeiten, die bei der Pfahlfußreflexion zum Zeitpunkt $t_i = T$ auftreten, sind nach Gleichung (3.24) auf die vorhandenen Dämpfungseffekte zurückzuführen. Zur iterativen Anpassung der Dämpfungsparameter erfolgt eine Neuberechnung ab $t_i = 0$. Tritt eine kleinere Abweichung der Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt $t = T$ als die Fehlerschranke FS auf, ist die Berechnung beendet.

Als Anwendungsbeispiel für den Identifikationsalgorithmus A wird zunächst die Identifikation eines simulierten Signals vorgestellt. Die Simulation erfolgt für eine Pfahlgeometrie entsprechend der Testpfahlmessungen mit einer Querschnittsreduzierung auf 80% und einer Fehlstellenbreite von einem Meter. Die erzielte gute Anpassung ist in Abb. 7.27 durch die Gegenüberstellung des simulierten und des resultierenden identifizierten Geschwindigkeitsverlaufs dargestellt. Der Vergleich des mit der Identifikation berechneten Verlaufs der Querschnittsfläche entlang der Pfalachse und des bei der Simulation vorgegebenen Verlaufs zeigt die Möglichkeit einer ausreichenden Quantifizierung der Fehlstellengröße (Abb. 7.28). Der E-Modul wird für die Berechnung konstant angenommen.

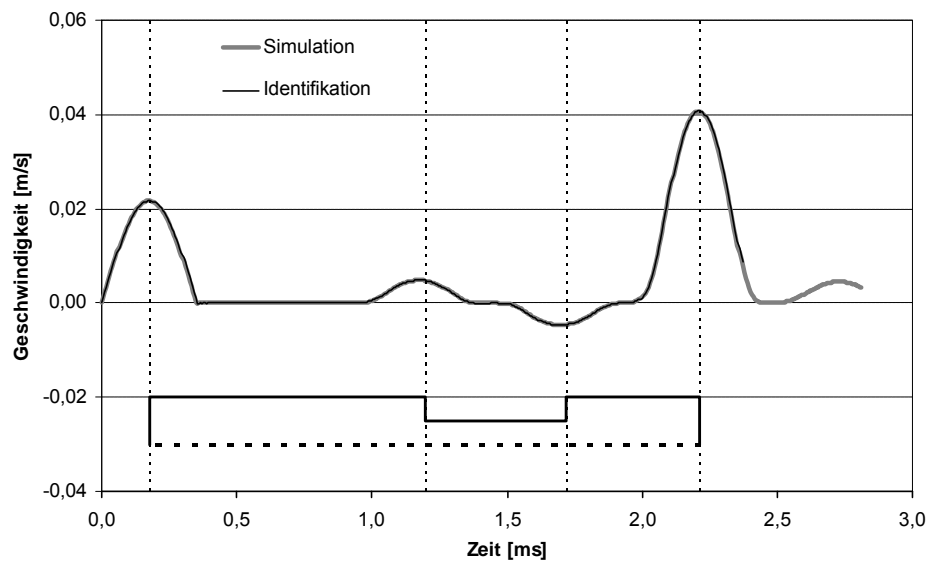


Abb. 7.27: Vergleich des simulierten und identifizierten Geschwindigkeitsverlaufs

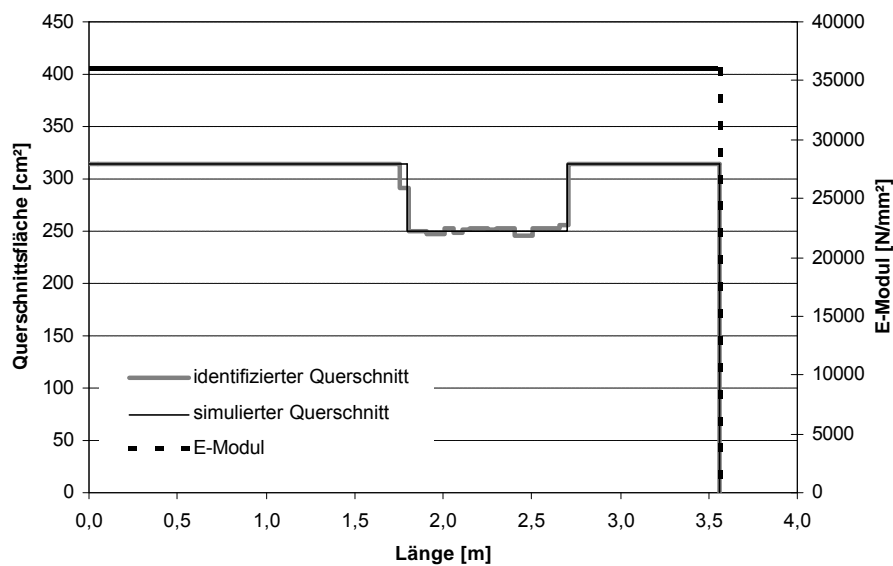


Abb. 7.28: Vergleich des simulierten und identifizierten Verlaufs der Querschnittsfläche

Ziel der Untersuchung ist die Identifikation anhand eines Meßsignals. Beispielhaft hierfür dient die Anwendung des Algorithmus auf die Testpfahlmessung der Geometrievariation 23 mit einer Querschnittsreduzierung auf 60% und einer Fehlstellenbreite von einem Meter. Die gute Anpassung des berechneten an den gemessenen Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 7.29 zu erkennen.

Im Gegensatz zur guten Anpassung der Geschwindigkeitsverläufe zeigen sich sehr große Abweichungen zwischen identifiziertem und vorhandenem Verlauf der Querschnittsfläche entlang der Pfahlachse (Abb. 7.30).

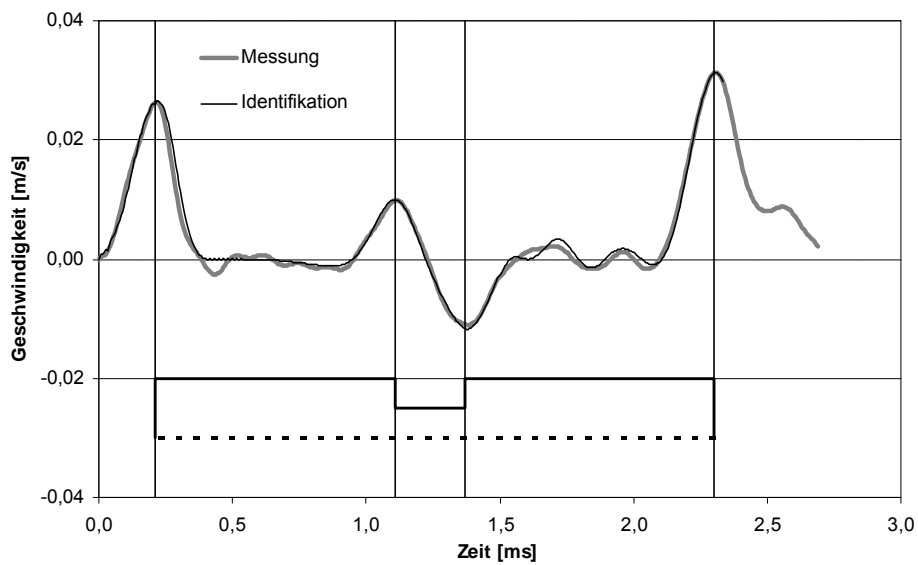


Abb. 7.29: Vergleich des gemessenen und identifizierten Geschwindigkeitsverlaufs

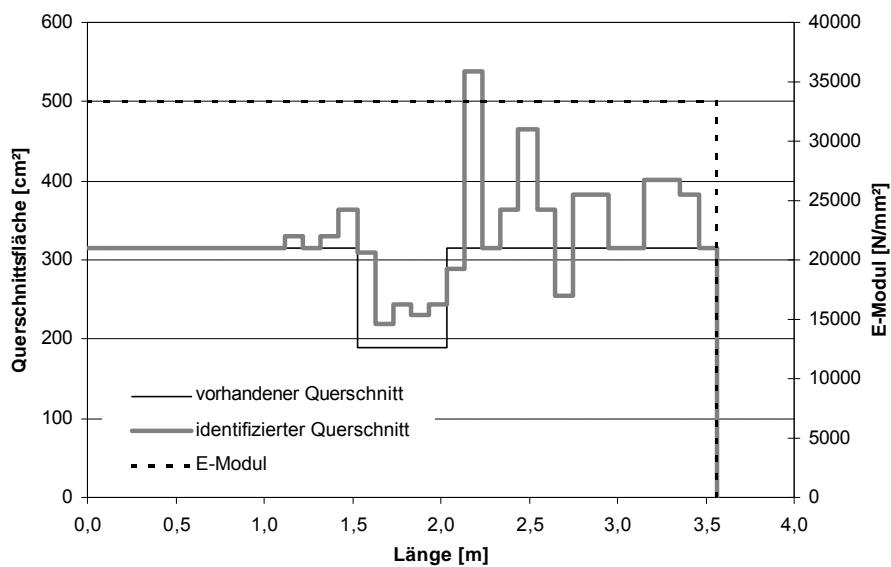


Abb. 7.30: Vergleich des vorhandenen und identifizierten Verlaufs der Querschnittsfläche

Die Abweichungen können zum einen damit begründet werden, daß bei der Identifikation meßtechnische Störsignale auf Impedanz- bzw. Querschnittsänderungen zurückgeführt werden. Zum anderen zeigt sich, daß der Zusammenhang zwischen Impedanz- bzw. Querschnittsänderung und resultierendem Geschwindigkeitsverlauf nicht eindeutig ist.

Obwohl eine gute Anpassung der Geschwindigkeitsverläufe mit dem Identifikationsalgorithmus A erzielt wird, ergibt sich keine ausreichende Aussage über das eigentliche Auswertungsergebnis - die Pfahlgeometrie.

7.4.2.1 Identifikationsalgorithmus B

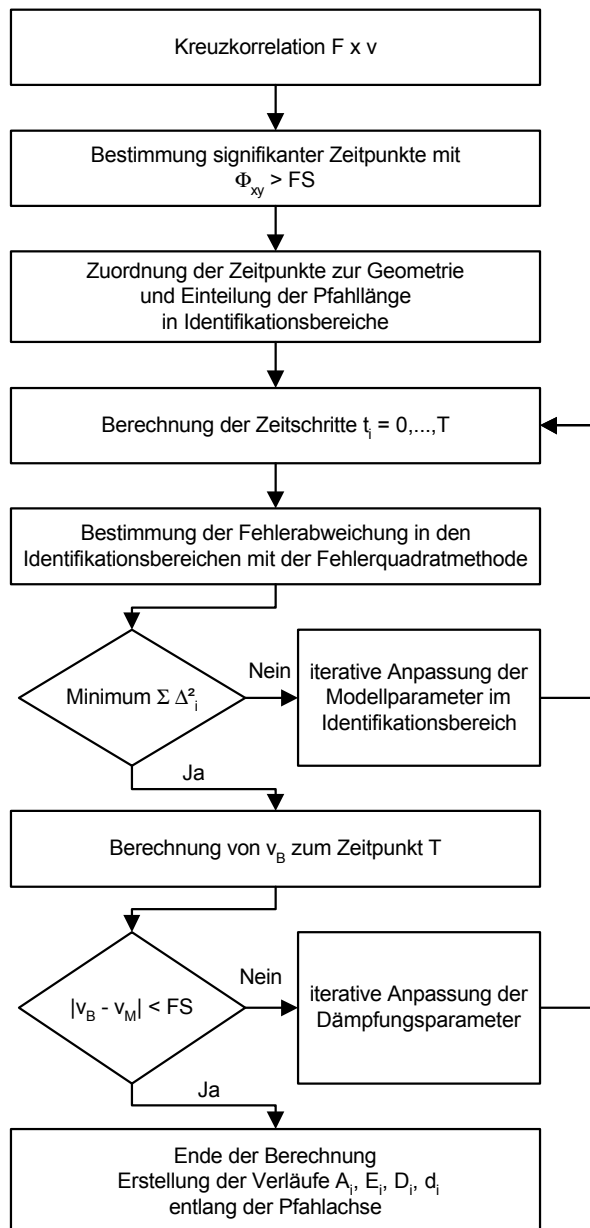


Abb. 7.31: Ablauf des Identifikationsalgorithmus B

Ein Ergebnis der Kreuzkorrelation Φ_{xy} zwischen Stoßkraftverlauf F und Geschwindigkeitsverlauf v ist in Abb. 7.32 dargestellt. Mit Hilfe einer Fehlergrenze FS und einer Extremwertbetrachtung können signifikante Zeitpunkte festgelegt und deren Laufzeitdifferenzen sehr genau bestimmt werden. FS kann in Abhängigkeit der statistischen Erhaltung des Stoßimpulses mit $|0 < FS < 1|$ eingeschränkt und somit normiert, d.h. unabhängig von der vorherrschenden Teilchengeschwindigkeit, vorgegeben werden. Anhand der signifikanten Zeitpunkte erfolgt eine Aufteilung der Pfahlänge in Identifikationsbereiche. Für die

Um eine quantitative Aussage über die Pfahlgeometrie mit Hilfe einer Identifikationsberechnung zu ermöglichen, wird eine zweite Vorgehensweise vorgestellt.

Das Ziel hierbei ist weniger eine gute Anpassung des Meßverlaufs einschließlich der Störeinflüsse, sondern eine optimale Aussagemöglichkeit über die Pfahlgeometrie. Der Berechnungsablauf ist in Abb. 7.31. gezeigt.

Um meßtechnische Störeinflüsse zu eliminieren, können, wie in Kap. 7.1 beschrieben, Frequenzfilter verwendet werden. Damit es bei der Anwendung nicht zu Änderungen der Laufzeitdifferenzen kommt, ist eine individuelle Anpassung an das Meßsignal erforderlich. Somit sind die Frequenzfilter für die automatisierte Anwendung hier nicht geeignet. Als geeignete Alternative wird in Kap. 7.2 die Anwendung der Kreuzkorrelation vorgestellt. Hiermit können die inkohärenten Signalanteile eliminiert werden, und die Laufzeitdifferenzen können aufgrund der Nullphasigkeit genau bestimmt werden.

Testpfahlgeometrie ergibt sich die Zuordnung von t_{F1} als Beginn und t_{F2} als Ende eines Identifikationsbereiches. Aufgrund der Nullphasigkeit der Kreuzkorrelation können direkt aus den Laufzeitdifferenzen die korrespondierenden Tiefen entlang der Pfahlachse berechnet werden.

Für den Identifikationsprozeß in den festgelegten Bereichen werden die gewonnenen Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Fehlstellenauflösung in Kap. 5 genutzt. Hierbei wird festgestellt, daß die Fehlstellenform nicht eindeutig differenziert werden kann. Die Interpretation der Form kann auf eine sprungartige Querschnittsänderung beschränkt werden. Tritt eine allmähliche Änderung auf, ergibt die Auswertung eine sprungartige Querschnittsänderung mit einer interpretierbaren mittleren Länge (vgl. Kap.5.4.3.1).

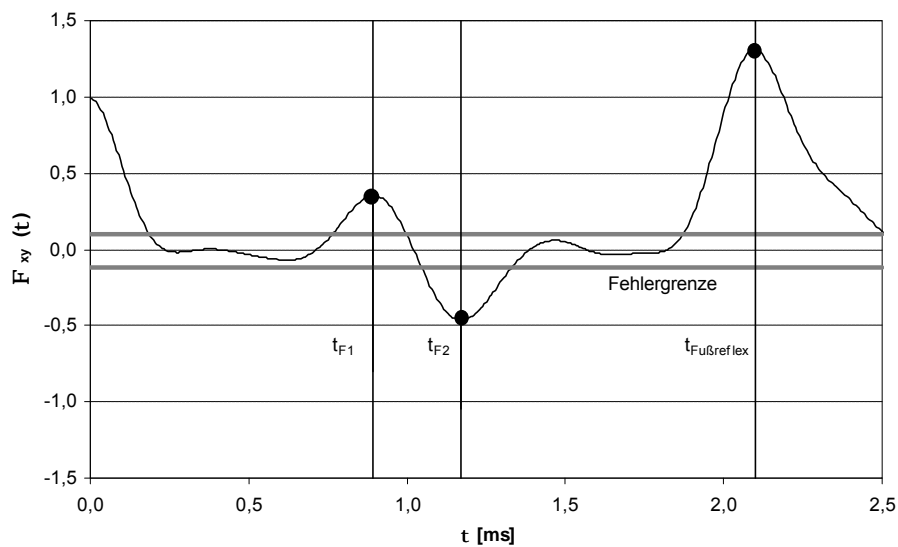


Abb. 7.32: Ergebnis der Kreuzkorrelation und Bestimmung signifikanter Zeitpunkte

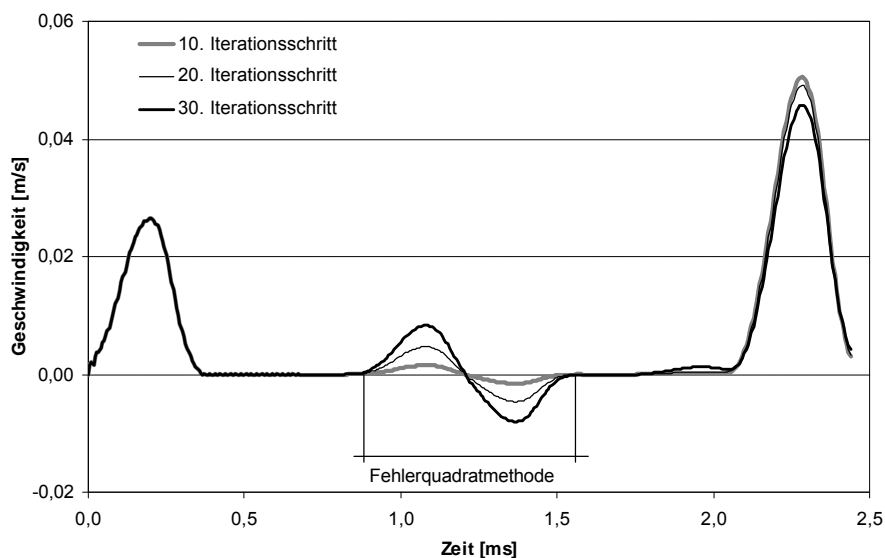


Abb. 7.33: Anwendung der Fehlerquadratmethode

Im Gegensatz zu dem Identifikationsalgorithmus A erfolgt beim Vorgehen B keine zeitschrittweise Berechnung und Anpassung. Es wird sofort der gesamte Geschwindigkeitsverlauf bis zum Zeitpunkt $t = T$ berechnet. Das Ausgleichsproblem der Fehlerabweichung in den Identifikationsbereichen wird auf Basis der Fehlerquadratmethode realisiert [87], [21]. Für den berechneten Geschwindigkeitsverlauf wird die Quadratsumme der Fehlerabweichungen in den Identifikationsbereichen errechnet. Für die folgende Iteration werden über den gesamten Identifikationsbereich die Modellparameter für alle Elemente gleich angepaßt (Abb. 7.33). Die Iteration endet, wenn ein Minimum der Quadratsumme erreicht ist. Die Anpassung der Dämpfungsparameter erfolgt analog zum Algorithmus A über die Anpassung der Pfahlfußreflexion.

Als Anwendungsbeispiel für den Identifikationsalgorithmus B wird analog zum Algorithmus A zunächst die Identifikation eines simulierten Signals vorgestellt. Hierbei wird das gleiche Simulationssignal verwendet. Die erzielte, ebenfalls gute Anpassung des identifizierten an den simulierten Geschwindigkeitsverlaufs ist in Abb. 7.34 zu erkennen. Auch der Vergleich des Verlaufs der Querschnittsfläche zeigt die Möglichkeit der Quantifizierung der Fehlstellengröße (Abb. 7.35).

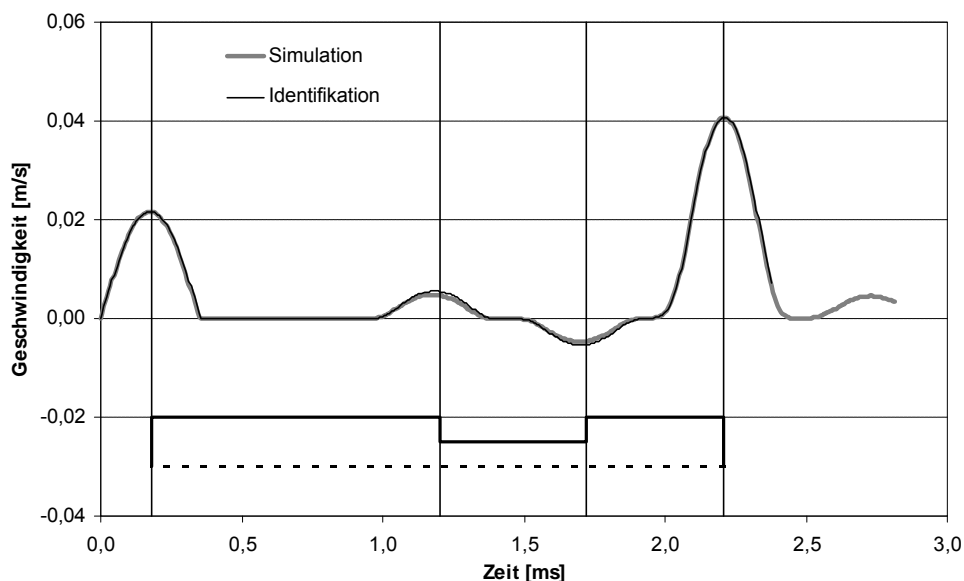


Abb. 7.34: Vergleich des simulierten und identifizierten Geschwindigkeitsverlaufs

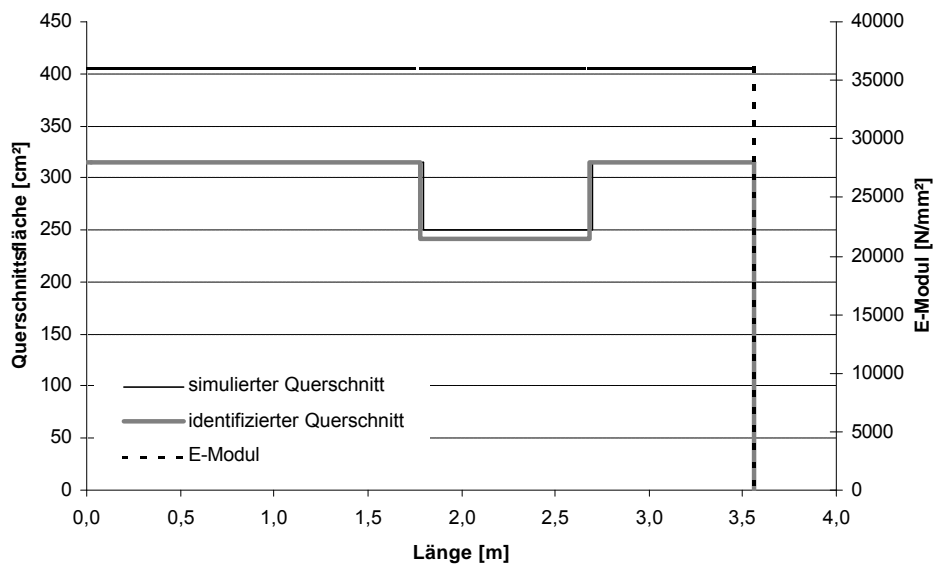


Abb. 7.35: Vergleich des simulierten und identifizierten Verlaufs der Querschnittsfläche

Die Anwendbarkeit des Algorithmus B für die Identifikation eines Meßsignals wird ebenfalls beispielhaft für die Geometrievariation 23 vorgestellt. Der gemessene und der berechnete Geschwindigkeitsverlauf ist in Abb. 7.36 gegenübergestellt. Für den Identifikationsbereich ist eine gute Anpassung festzustellen. Schwankungen infolge meßtechnischer Störeinflüsse werden nicht in die Identifikation mit einbezogen und sind daher im Verlauf nicht angepaßt. Der Vergleich des identifizierten mit dem vorhandenen Verlauf der Querschnittsfläche entlang der Pfahlachse zeigt nur geringe Abweichungen und somit die Möglichkeit einer ausreichenden Quantifizierung der Fehlstellengröße (Abb. 7.37).

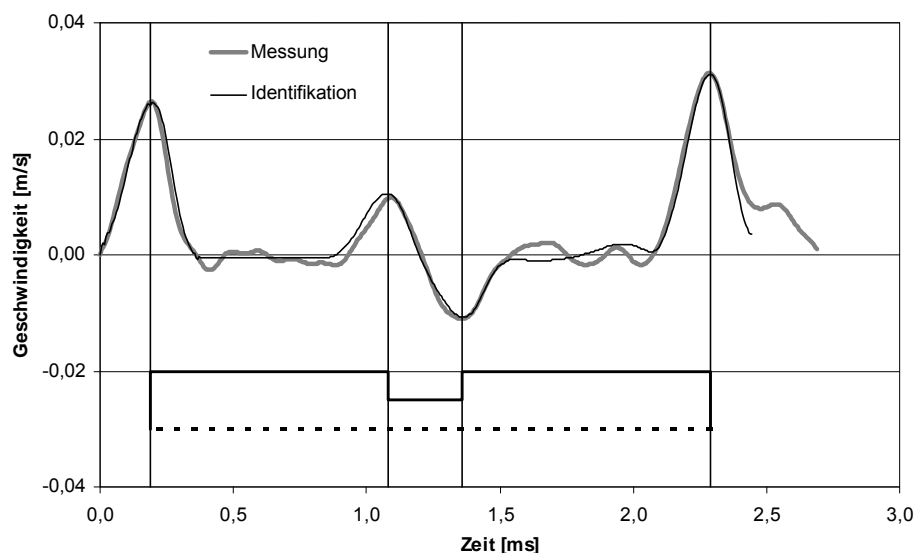


Abb. 7.36: Vergleich des gemessenen und identifizierten Geschwindigkeitsverlaufs

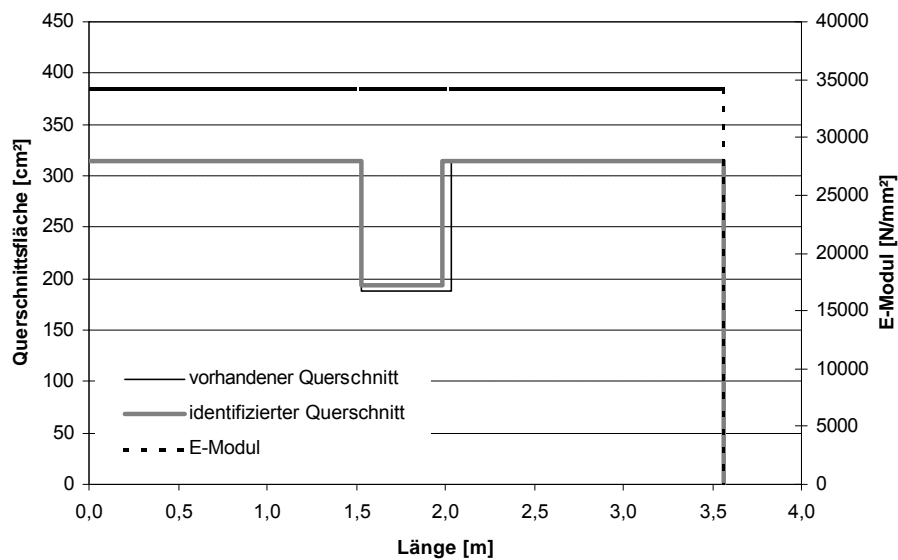


Abb. 7.37: Vergleich des vorhandenen und identifizierten Verlaufs der Querschnittsfläche

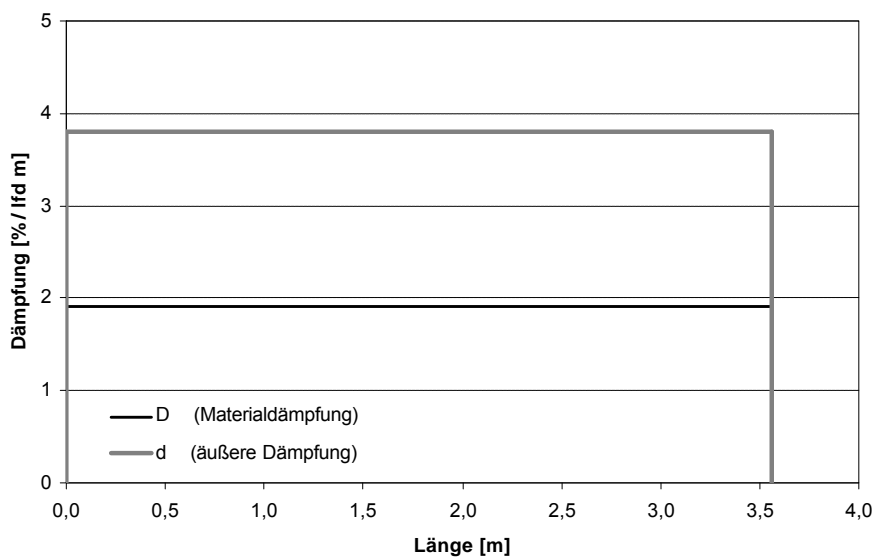


Abb. 7.38: Resultierende Dämpfungsverteilung bei der Identifikation

Der aus der Identifikation resultierende Verlauf der Parameter für Material- und Bodendämpfung ist in Abb. 7.38 dargestellt. Analog zur Simulation des Bodeneinflusses bei den Testpfahlmessungen (vgl. Kap. 6) wird eine konstante Verteilung angesetzt.

Die Ergebnisse der Identifikationsberechnung mit Algorithmus B für die Auswertung der Geometrievariationen mit einer sprunghaften Querschnittsänderung der Testpfahlmessungen an Pfahl 1 sind in Tab. 7.6 angegeben. Die vorhandenen Fehlstellenbreiten und Querschnittsflächen werden mit einer ausreichenden Genauigkeit identifiziert.

Tab. 7.6: Ergebnisse für die Identifikation der Testpfahlmessung an Pfahl 1

Variation	l_{Grenz} / B_F	Fehlstellenbreite B_F [cm]		Querschnittsfläche der Fehlstelle [cm²]	
	[-]	vorhanden	identifiziert	vorhanden	identifiziert
$\lambda_{\text{Grenz}} / B_F > 4$					
10	54,4	2	36	188	267
13	14,6	10	37	188	252
$\lambda_{\text{Grenz}} / B_F < 4$					
19	2,5	50	48	188	193
23	1,3	100	92	188	205

Entsprechend der Erkenntnisse aus Kap. 5 können die Fehlstellen mit einer Breite $B_F < \lambda_{\text{Grenz}}/4 = 31,5$ cm in Abhängigkeit des Stoßimpulses nicht bestimmt werden. Es wird eine größere Fehlstellenbreite und eine geringe Querschnittsreduzierung erkannt. Die resultierende Fehlerabweichung von der vorhandenen Fehlstellenbreite ist in Abb. 7.39 zu ersehen.

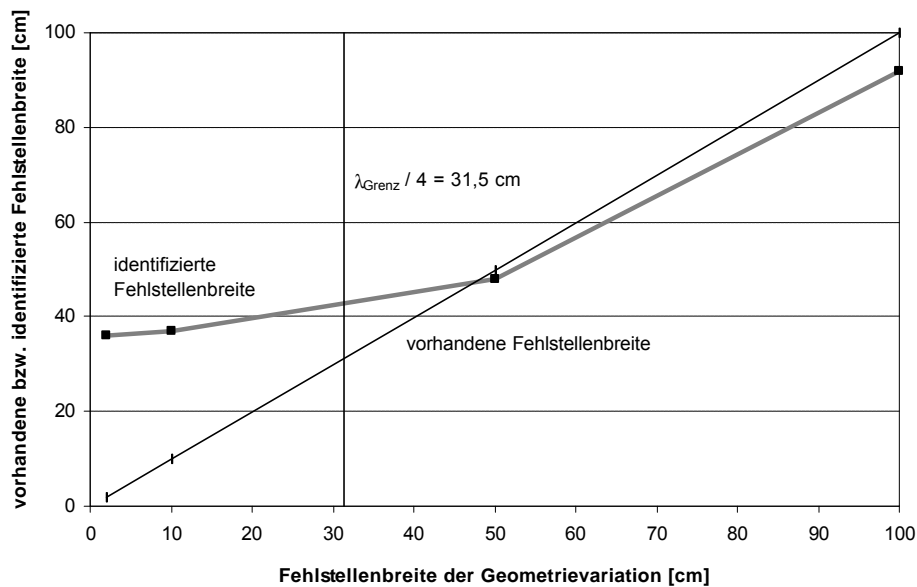


Abb. 7.39: Vergleich der vorhandenen mit der identifizierten Fehlstellenbreite

Als abschließendes Beispiel wird die Anwendbarkeit des Algorithmus anhand einer in situ Messung gezeigt. Betrachtet wird ein Bohrpfahl mit einer Länge von $L = 16,2$ m. Die Anpassung des Meßsignals ist in Abb. 7.40 und der daraus resultierende Verlauf der Querschnittsfläche in Abb. 7.41 dargestellt. Es zeigt sich ein plausibler Verlauf.

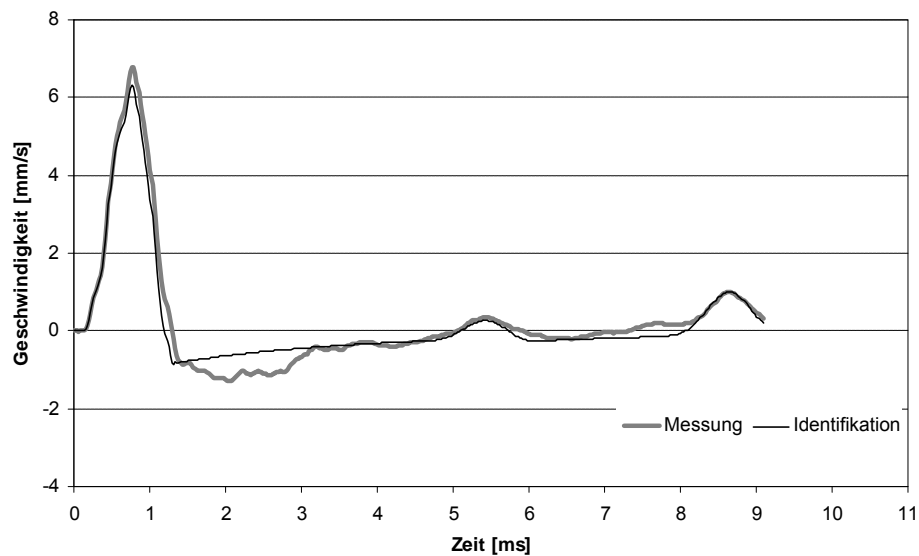


Abb. 7.40: Vergleich des gemessenen und identifizierten Geschwindigkeitsverlaufs

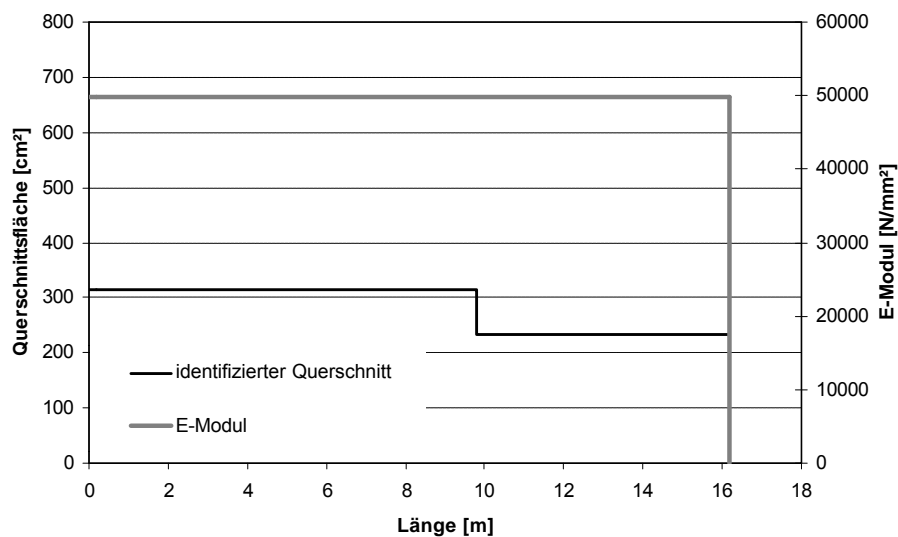


Abb. 7.41: Identifizierter Verlauf der Querschnittsfläche

7.4.3 Zusammenfassung der Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendbarkeit einer parametrischen Identifikation am Vorwärtsmodell zur Auswertung von Integritätsmessungen wird gezeigt. Problematisch ist hierbei der geringe zur Verfügung stehende Informationsgehalt der Meßdaten. Dieser kann jedoch für die Standardmessung nicht vergrößert werden. Neben den Meßdaten werden zusätzliche Daten von der Pfahlherstellung und der Baugrunderkundung für die Identifikation herangezogen.

Eine optimale Anpassung von gemessenen und berechneten Meßsignalverläufen mit dem Identifikationsalgorithmus A führt nicht zu einer eindeutigen Aussage über die Pfahlgeometrie. Erst die Elimination meßtechnischer Störeinflüsse mit der Kreuzkorrelation und die Verwendung der Fehlerquadratmethode für das Ausgleichsproblem führen mit dem Identifikationsalgorithmus B zu ausreichenden Aussagemöglichkeiten über die Pfahlgeometrie. Mit diesem Algorithmus kann anhand der vorgestellten Beispiele die Möglichkeit der Fehlstellenquantifizierung gezeigt werden. Für die Anwendung des Algorithmus auch bei speziellen Randbedingungen bezüglich z.B. des Bodeneinflusses und der Pfahlgeometrie sind jedoch Weiterentwicklungen anzustreben.

Zur Anpassung der Modellparameter werden bei den Testpfahlmessungen neben den Dämpfungsparametern die Geometrieparameter betrachtet. Die Materialparameter werden konstant angenommen. Zur Aufteilung bzw. Wichtung der Einflußfaktoren sind weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Die Größe der Dämpfungsparameter wird mit dem vorgestellten Algorithmus iterativ bestimmt. Die Wichtung des Bodendämpfungsverlaufs muß anhand der Analyse der Baugrundinformationen vorgegeben werden. Von Interesse ist die Entwicklung einer automatisierten Analyse und Aufbereitung der Baugrunddaten für die Identifikation.

Weiterhin ist für die optimierte Zuordnung in Identifikationsbereiche eine automatisierte Vorgabe der Fehlerschranke zur Bestimmung der signifikanten Zeitpunkte wesentlich. Bei großer Dämpfung der Pfahlfußreflexion kann hierbei eine Verstärkung der Kreuzkorrelation zur Bestimmung der Laufzeit einbezogen werden.

8 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Beurteilungsmöglichkeiten hinsichtlich der Integrität eines Pfahls anhand der dynamischen „low-strain“ Integritätsprüfung auf Basis der Reflexionsmethode zu optimieren. Zur Bewertung der Aussage- und Anwendungsmöglichkeiten wurden Untersuchungen der Meß- und der Auswertemethodik durchgeführt.

Zur Untersuchung der Meßmethodik wurde im Rahmen der Arbeit ein spezielles Meßsystem entwickelt, mit dem auch die hochfrequenten Anteile der erzeugten Stoßwellenausbreitung im Pfahl ausreichend genau erfaßt werden können. Die Anforderungen an die Komponenten des Meßsystems wurden in Abhängigkeit des angeregten Stoßimpulses definiert.

Die Möglichkeit einer gezielten Vorgabe des Stoßimpulses wurde durch Messungen mit verschiedenen Impulseinleitungen an einem speziellen Modellpfahl untersucht. Für einen optimal an die Meßaufgabe angepaßten Stoß wurden die minimale und maximale Begrenzung der Impulsdauer in Abhängigkeit von der Pfahlgeometrie festgelegt.

Der Zusammenhang zwischen dem eingeleiteten Stoßimpuls und den Aussagemöglichkeiten der Prüfmethode über eventuell vorhandene Pfahlfehlstellen anhand der am Pfahlkopf gemessenen Wellenreflexionen wird aufgezeigt. Hierzu wurden die Ergebnisse umfangreicher Meßreihen an Testpfählen mit definierten Geometriefehlstellen sowie die weiterführende Analyse der theoretischen Zusammenhänge mit Simulationsberechnungen auf Basis der FEM herangezogen. Die mögliche Fehlstellenauflösung wird in Abhängigkeit der Grenzwellenlänge des Stoßimpulses definiert. Die Untersuchung weiterer Fehlstellenbildungen zeigt, daß die mit der Prüfmethode erfaßbare Form auf eine sprungartige, konstante Querschnittsänderung beschränkt ist. Dabei kann die Fehlstellenbreite und -lage unterhalb des Pfahlkopfs in bestimmten Grenzen erfaßt werden.

Als zusätzliches Symptom zur Detektion von kleinen Geometriefehlstellen wird bei den Testpfahlmessungen die Reduzierung der mittleren Wellenausbreitungsgeschwindigkeit festgestellt. Die Messung der Wellengeschwindigkeitsänderung ermöglicht auch die qualitative Erfassung kleiner Fehlstellen. Die gewonnenen Erkenntnisse werden durch Simulationsberechnungen bestätigt.

Zur Vergrößerung der meßtechnischen Informationen der Standardmeßkette wurden bei den Testpfahlmessungen „low-cost“ DMS-Meßaufnehmer, die im Rahmen der Arbeit entwickelt wurden, in zusätzlichen Meßebenen erprobt. Bei den durchgeführten Messungen konnte die Anwendbarkeit der Meßaufnehmer gezeigt werden. Durch die Auswertung der zusätzlichen Meßsignale sind Plausibilitätskontrollen und verbesserte Aussagen über die Fehlstellenbildung möglich.

Neben den Geometrie- und Materialeigenschaften des Pfahls hat die Interaktion des Pfahls mit dem umgebenden Boden wesentlichen Einfluß auf die Stoßwellenausbreitung. Der Dämpfungseinfluß des Bodens wurde anhand von Testpfahlmessungen und weiterer in situ Messungen vorgestellt. Zur Analyse des Bodeneinflusses wurden Simulationsberechnungen durchgeführt. Es wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie die für eine Berechnung erforderliche

Dämpfungsverteilung qualitativ aus den Baugrundinformationen gewonnen werden kann. Wenn ein signifikanter Bodeneinfluß auf den Geschwindigkeitsverlauf vorliegt, kann dieser in einer Berechnung simuliert werden.

Zur Verbesserung der Auswertemethodik im Zeitbereich wurde die Anwendung von Korrelationsalgorithmen analysiert. Die Kreuzkorrelation von Stoßkraft- und Geschwindigkeitsverlauf zeigt gegenüber der Standardmeßanalyse Vorteile bei der eindeutigen und direkten Bestimmung der Laufzeitdifferenzen. Aufgrund der Eliminierung inkohärenter Signalanteile und der Nullphasigkeit der Kreuzkorrelationsfunktion können lokale Maxima und Minima sehr genau bestimmt werden.

Die Untersuchung der Meßanalyse im Frequenzbereich wurde mit einer Anwendung der FFT vorgestellt. Die Ergebnisse der Frequenztransformation lassen nur eine generelle Aussage darüber zu, ob ein Pfahl unversehrt oder eine Fehlstelle vorhanden ist. Die Ergebnisse von Modalanalysen zeigen, daß Aussagen über die Art der Fehlstellenausbildung nicht eindeutig möglich sind.

Zur Auswertung von Integritätsprüfungen mit einer Meßsignalidentifikation wurden zwei Identifikationsalgorithmen entwickelt und erprobt. Die Anwendbarkeit einer parametrischen Identifikation am Vorwärtsmodell wurde aufgezeigt. In den Algorithmen wurden sämtliche bei den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse berücksichtigt. Der zur Verfügung stehende geringe Informationsgehalt der Meßdaten erschwert eindeutige Aussagen. Daher werden neben den Meßdaten zusätzliche Daten der Pfahlherstellung und der Baugrunderkundung für die Identifikation herangezogen. Die Elimination meßtechnischer Störeinflüsse mit der Kreuzkorrelation und die Verwendung der Fehlerquadratmethode für das Ausgleichsproblem führen zu ausreichend genauen quantitativen Aussagen über die Pfahlgeometrie.

Generell kann festgestellt werden, daß die Aussagemöglichkeiten der Integritätsprüfung wesentlich von den zur Verfügung stehenden Informationen abhängig sind. Liegen bei einer Standardmessung neben dem Beschleunigungsverlauf am Pfahlkopf keine zusätzlichen Informationen vor, ist die Beurteilung der Pfahlgeometrie nur eingeschränkt möglich. Erst wenn zusätzliche Informationen mit herangezogen werden können, ist eine eindeutige, quantitative Aussage möglich. Im Rahmen der Arbeit wurde vorgestellt, welche zusätzlichen Informationen berücksichtigt werden können und wie diese bei der Auswertung mit einer Meßsignalidentifikation anwendbar sind (Abb. 8.1). Der Meß- und Auswertungsaufwand ist dabei der erforderlichen Aussagequalität anzupassen.

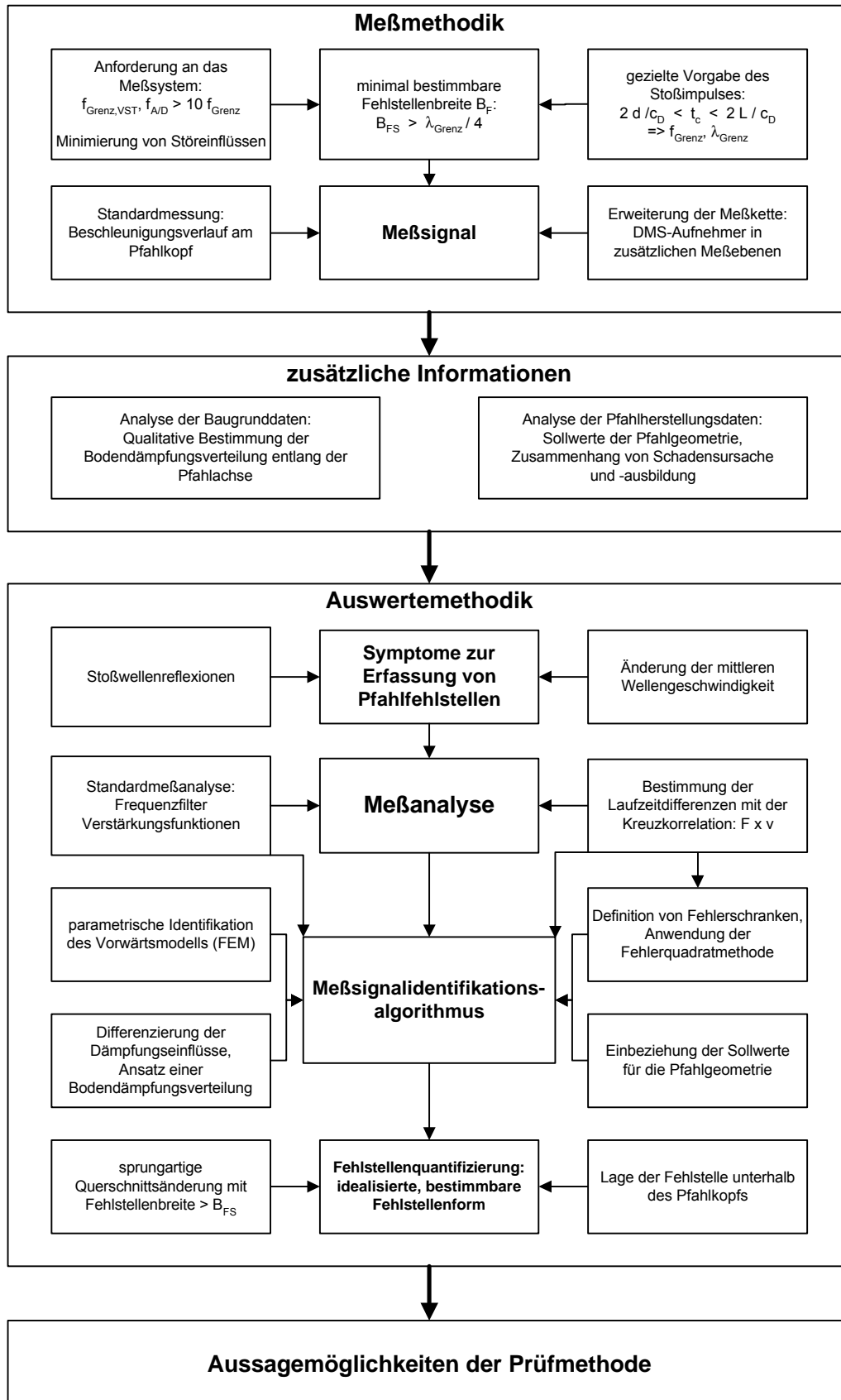


Abb. 8.1: Informationen zur Verbesserung der Aussagequalität von Integritätsprüfungen

9 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zur Optimierung der Meß- und Auswertemethodik von Integritätsprüfungen sollten bei zukünftigen in situ Messungen angewendet und weiterentwickelt werden.

Bezüglich der Meßmethodik können hierbei neben der gezielten Stoßimpulsvorgabe die entwickelten „low cost“ DMS-Meßaufnehmer eingesetzt werden. Außer der zusätzlichen meßtechnischen Information entlang der Pfahlachse ermöglichen die Meßaufnehmer wie erläutert eine Anwendung der Prüfmethode auch bei großen Pfahldurchmessern und großen Pfahllängen sowie bei großer Bodendämpfung. Der Einsatz der Meßaufnehmer kann durch die Entwicklung eines integralen Meßelements optimiert werden, das mit geringem Aufwand bei der Pfahlherstellung eingebunden werden kann (Abb. 9.1).

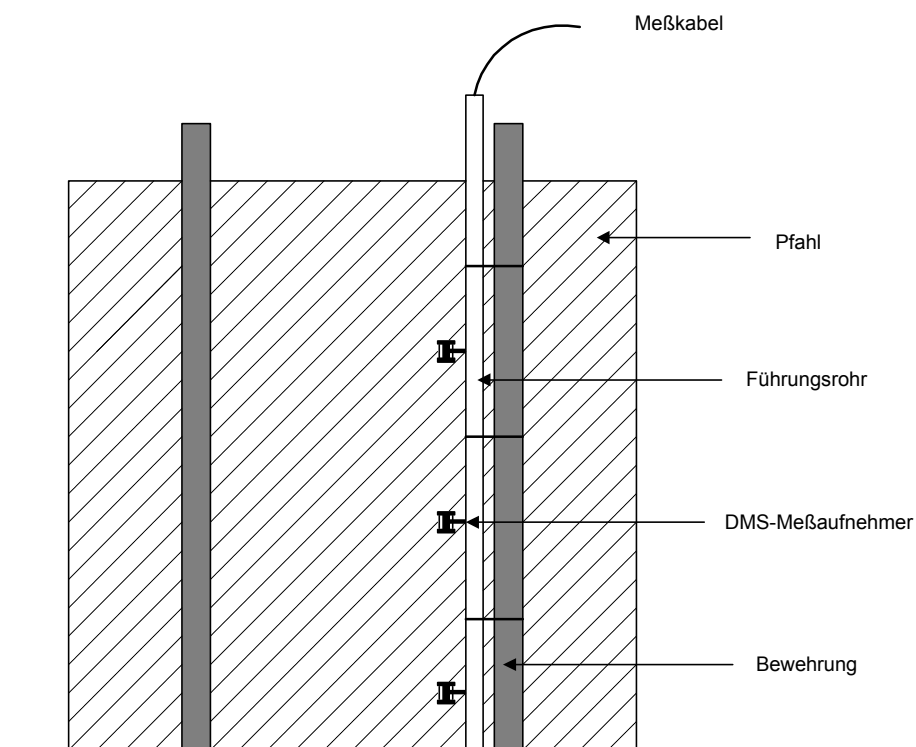


Abb. 9.1: Entwicklung eines integralen Meßelements

Zur Weiterentwicklung der gezielten Impulseinleitung wurde anhand von Simulationsberechnungen die Anregung eines gezielt begrenzten Frequenzbands mit einem Sweep vorgestellt. In weiteren Studien sollte deren meßtechnische Umsetzung untersucht werden.

Neben der Meßmethodik besteht auch Weiterentwicklungsbedarf bei der Methodik der Auswertung. Die Anwendbarkeit eines Meßsignalidentifikationsalgorithmus wurde gezeigt. Für die praktische Umsetzung auch bei speziellen Randbedingungen sollte die Entwicklung eines Expertensystems angestrebt werden. In ein derartiges System sollten mit Hilfe zukünftiger in situ Messungen weitere Erkenntnisse über charakteristische Einflüsse, z.B. spezielle Baugrundverhältnisse oder spezielle Pfahl- bzw. Gründungssysteme einbezogen werden.

Eine gesicherte Anwendungsmöglichkeit der Standardprüfmethode beschränkt sich derzeit auf Ramm- und Bohrpfähle. Als einfache und aussagekräftige Möglichkeit zur Qualitätskontrolle ist die Anwendung der Prüfmethode auf weitere Gründungselemente von großem Interesse. Erkenntnisse auf diesem Gebiet konnten durch in situ Messungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB· TUBS) bereits gewonnen werden. Eine Übersicht der Gründungssysteme, an denen erfolgreich Messungen durchgeführt wurden, ist in Abb. 9.2 gegeben. Ein Ziel weiterführender Arbeiten am IGB· TUBS ist die Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten der Stoßprüfung auf derartige Gründungssysteme.

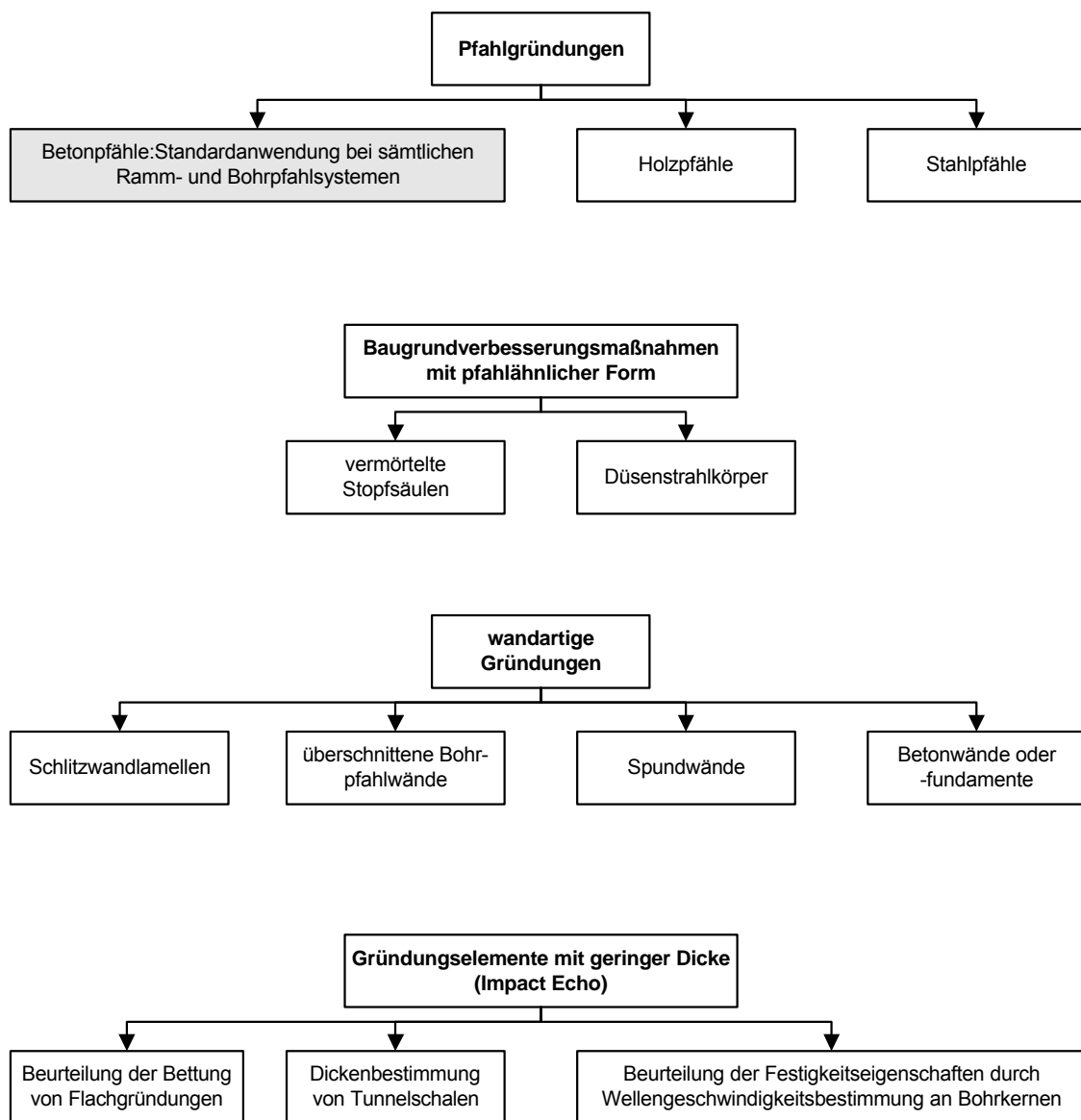


Abb. 9.2: Anwendung der Prüfmethode auf weitere Gründungssysteme

10 Literaturverzeichnis

- [1] AHRENS, H.; DINKLER, D. (1994): Finite-Element-Methode; Teil 1; Bericht Nr. 88 - 50 aus dem Institut für Statik der Technischen Universität Braunschweig.
- [2] AMIN, N.; SHAHNAZ, S.; SHAHNAJ, S. (1996): Integrity testing of foundation piles in Bangladesh - a case study; Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 644 - 656.
- [3] ANSYS (1999): ANSYS User's Manuals I-IV, Revision 5.6, Swanson Analysis Systems, USA.
- [4] ANTES, H. (1988): Anwendung der Methode der Randelemente in der Elastodynamik und der Fluidodynamik; Teubner Verlag, Stuttgart.
- [5] BALTHAUS, H. G. (1985): Theoretische Grundlagen dynamischer Pfahltestverfahren; Seminar Dynamische Pfahltests; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 19, S. 21-51.
- [6] BALTHAUS, H. G. (1986): Zur Bestimmung der Tragfähigkeit von Pfählen mit dynamischen Pfahlprüfmethode; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 21.
- [7] BATHE, K.-J. (1990): Finite-Elemente-Methoden; Deutsche Übersetzung von Zimmermann, P.; Springer Verlag.
- [8] BERHAN, B. (2000): Anwendung von Korrelationsalgorithmen zur Auswertung von Integritätsprüfungen; Studienarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig; unveröffentlicht.
- [9] BERZI, P.; SZABO, T.; FORSS, J. (1994): Estimation of material constants from impact tests; Second International Symposium on Inverse Problems, 02. - 04. November 1994, S. 71 - 78.
- [10] BRETTMANN, T.; FRANK, M.; BERRY, B. (1996): Evaluation of Defect Detection During Pile Curing Using Sonic Integrity Logging Methods, Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11.-13. September 1996, Orlando, Florida, S. 688 - 697.
- [11] BRETTMANN, T.; FRANK, M. (1996): Comparison of Crosshole and Singlehole Sonic Integrity Logging Methods, Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 698 - 707.
- [12] BUJA, H.-O.(1998): Handbuch des Spezialtiefbaus: Geräte und Verfahren; 1. Auflage; Werner Verlag, Düsseldorf.
- [13] CHEN, L.; MEIER, K. (1991): Spektralanalyse von dynamischen Pfahltests – erste Ergebnisse; Pfahlsymposium 1991; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 38, S. 99 - 118.

- [14] CHEN, S.; KIM, Y. R. (1996): Dispersive wave propagation analysis for condition assessment of marine timber piles, Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 721 - 732.
- [15] COTTIN, N.; FELGENHAUER, H.-P.; NATKE, H. G. (1984): On the parameter identification of elastomechanical systems using input and output residuals; Ingenieur-Archiv 54, S. 378 - 387.
- [16] COTTIN, N.; NATKE, H. G. (1986): On the parameter identification of elastomechanical systems using weighted input and modal residuals; Ingenieur-Archiv 56, S. 106 - 113.
- [17] DGGT (1998): Empfehlungen für statische und dynamische Pfahlprüfungen; Arbeitskreis 2.1 der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT); Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig.
- [18] ELLNER, A. (1996): Seminar Pfahlgründungen; LGA Bayern, Technische Fortbildung, 27. Juni 1996, Würzburg.
- [19] ELMER, K.-H. (1995): Modellierung und Simulation einer Dehnwelle zur Rißerkennung im Stab; Technische Mechanik; Band 15, Heft 1, S. 33 - 42.
- [20] ELMER, K.-H. (1996): Möglichkeiten zur Detektion, Lokalisierung und Quantifizierung von Defekten durch Stoßwellen; IV. Kolloquium Technische Diagnostik, 14. - 15. März 1996; Professur für Technische Diagnostik der Technischen Universität Dresden, S. 248 - 257.
- [21] ENGELN-MÜLLGES, G.; REUTTER, F. (1996): Numerik Algorithmen, Entscheidungshilfe zur Auswahl und Nutzung; 8. Auflage; VDI Verlag, Düsseldorf.
- [22] ERNST, U. (2001): Schadensursachen bei der Herstellung von Bohrpfählen im Grundwasser; Pfahlsymposium 2001; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 65, S. 103 - 120.
- [23] FEHE, P. (1996): Großflächiges Anheben; Hoch- und Tiefbau; Jg. 49, Nr. 9, S. 58 - 59.
- [24] FINNO, R. J.; GASSMANN, S.; PROMMER, P. (1996): Effect of intervening structure on impulse response signal; Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 708 - 720.
- [25] FRITZEN, C.-P.; KIEFER, T.; HÄNISCH-LUTTENSCHLAGER, K. (1993): Schadenserkennung mit Hilfe Fehler-Lokalisierungsverfahren; Dynamische Probleme – Modellierung und Wirklichkeit, Mitteilung des Curt-Risch-Instituts der Universität Hannover, 07. - 08. Oktober 1993, S. 287 - 307.
- [26] GOBLE, G. G.; RAUSCHE, F.; LIKINS, G. E. (1980): The analysis of pile driving - A state-of-the-art; Proceedings of the Seminar on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 04. - 05. June 1980, Stockholm, Schweden, S. 131 - 161.
- [27] GÖTZ, H. (1998): Einführung in die digitale Signalverarbeitung; 3. Auflage, Teubner Verlag, Stuttgart.
- [28] GRL (1996): Pile Integrity Tester – PC Users Manual; Version 96.1; Goble Rausche Likins and Associates Inc.(GRL); Cleveland, Ohio.

- [29] GRL (1995): Pile Integrity Tester – WAP Users Manual; Version 95.1; Goble Rausche Likins and Associates Inc.(GRL); Cleveland, Ohio.
- [30] GYGER, M.; KUHN, B.; WERDER, F. (1996): Probleme mit Verdrängungspfählen in wassergesättigtem Seebodenlehm; Schweizer-Ingenieur und Architekt; Jg.114, Nr. 8, S. 4 - 8.
- [31] HABEL, W. R. (1997): Faseroptische Dehnungsaufnehmer für hochauflösende Verformungs- und Temperaturmessungen; GESA Kolloquium, Köln, S.249 - 264.
- [32] HARTUNG, M. (1991): Integritätstest an Modell- und Bauwerkspfählen; Seminar Dynamische Pfahltests 1991; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 38, S. 233 - 267.
- [33] HARTUNG, M.; MEIER, K.; RODATZ, W. (1992): Integrity testing on model piles; 4th International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 21. - 24. September 1992, The Hague, Netherlands, S. 265 - 269.
- [34] HARTUNG, M. (1993): Qualitätssicherung bei der Pfahlherstellung; Pfahlsymposium 1993; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 41, S. 261 - 279.
- [35] HAUPT, W. (1986): Bodendynamik, Grundlagen und Anwendungen; Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig/Wiesbaden.
- [36] HEDERER, A. (1981): Dynamisches Messen, Messen von schnellveränderlichen elektrischen und nichtelektrischen Größen; 2. Auflage; expert Verlag, Grafenau.
- [37] HERRMANN, T. (1996): Parametrische Identifikation nichtklassisch gedämpfter Finite Elemente Modelle im Zeitbereich; Fortschrittsbericht VDI Reihe 11 Nr. 234, VDI Verlag, Düsseldorf.
- [38] HILLMER, K. (1991): Schäden im Gründungsbereich; Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
- [39] HOFFMANN, K.: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmeßstreifen; Hottinger Baldwin Meßtechnik GmbH, Darmstadt.
- [40] HOLT, J. D (1996): Finding the lengths of installed steel-H-piles by dispersive bending wave propagation methods; Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 1172 - 1185.
- [41] HSIEH, N.-P.; HOLMQUIST, D. V.; TRAPANI, R. J. (1988): Stress wave propagation testing of large diameter caissons, Glenwood Canyon, Colorado; Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 25. - 27. Mai 1988, Ottawa, Canada, S. 56 - 67.
- [42] IBMB (2000): Prüfprotokoll der Betondruckfestigkeit vom 01.08.2000 und 22.08.2000; Materialprüfanstalt für das Bauwesen; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der Technischen Universität Braunschweig.
- [43] JÄGER MESSTECHNIK (1998): ADbasic, Echtzeit-Entwicklungstool für Adwin-Systeme; Version 3.0; Jäger Meßtechnik GmbH, Lorsch.

- [44] JÜTTEMANN, H. (1974): Einführung in das elektrische Messen nichtelektrischer Größen; 2. Auflage; VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [45] KALINKE, P. (1998): Die Änderung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit als Symptom zur zerstörungsfreien Schadensdetektion; Mitteilung des Curt-Risch-Instituts der Universität Hannover.
- [46] KAPP, H. (1978): Zerstörungsfreie Pfahlprüfmethode, Möglichkeiten und praktische Erfahrungen, Mitteilungen der Schweizerischen Gesellschaft für Boden- und Felsmechanik, Herbsttagung 03. November 1978, Bern.
- [47] KEIL, S. (1995): Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen; Cuneus Verlag, Zwingenberg an der Bergstraße.
- [48] KIRSCH, F.; PLASSMANN, B.; HUCH, T.; RODATZ, W. (2000): Dynamic Pile Testing and Finite Element Calculations for the Bearing Capacity of a Quay Wall Foundation – Container Terminal Altenwerder, Port of Hamburg; Sixth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 2000, Sao Paulo, Brazil, S. 688 - 697.
- [49] KLINGMÜLLER, O. (1984): Dynamische Pfahlprüfung als nichtlineare Systemidentifikation; Dynamische Probleme – Modellierung und Wirklichkeit; Band 2; Mitteilung des Curt-Risch-Instituts der Universität Hannover, S. 537 - 554.
- [50] KLINGMÜLLER, O. (1996): Low strain integrity testing as quality control of old piles for reintegration in a new foundation; Fifth International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 11. - 13. September 1996, Orlando, Florida, S. 626-632.
- [51] KLUCKERT, K.-D. (1999): Rückblick auf 40 Jahre Bohrpfahltechnik – Gibt es noch Impulse für die Zukunft; Tiefbau; Jg. 111, Nr. 6, S. 332 - 341.
- [52] KOLYMBAS, D. (1989): Pfahlgründungen; Springer Verlag.
- [53] LADJAREVIC, M.; GOLDSCHIEDER, M. (1996): Bestimmung der Länge historischer Holzpfähle mit einer Hammerschlagmethode; Bautechnik 73, Heft 6, Ernst & Sohn Verlag, S. 356 - 367.
- [54] LATZ, K. (1994): Dynamische Interaktion von Flüssigkeitsbehältern und Baugrund; Braunschweiger Schriften zur Mechanik Nr. 16-1994; Mechanik-Zentrum der Technischen Universität Braunschweig.
- [55] LOUIS, A. K. (1989): Inverse und schlecht gestellte Probleme, Teubner Verlag, Stuttgart.
- [56] MEIER, S.; KELLER, W. (1990): Geo-Statistik; Springer Verlag.
- [57] MIDDENDORP, P. (1999): Wann wendet man die dynamische Belastungsprüfung an und wann die statnamische Prüfung?; Pfahlsymposium 1999; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 60, S. 159 - 178.
- [58] MILITZER, H.; WEBER, F. (1987): Angewandte Geophysik; Band 3: Seismik; Springer Verlag.

- [59] MORGANO, C. M. (1994): Determining embedment depths of deep foundations using parallel seismic testing; PDA User-Day, Göteborg.
- [60] MÜLLER, K. (1996): Mechanische Größen, elektrisch gemessen; 4. Auflage; expert-Verlag, Renningen-Malmsheim.
- [61] NATKE, H. G. (1982): Die systematische Anpassung von Rechenmodellen an Versuchswerte als Verfahren zum Nachweis des dynamischen Systemverhaltens; Bauingenieur 57, S. 287 - 292.
- [62] NATKE, H. G. (1983): Einführung in Theorie und Praxis der Zeitreihen- und Modalanalyse, Identifikation schwingungsfähiger elastomechanischer Systeme; Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig/Wiesbaden.
- [63] NATKE, H. G.; COTTIN, N. (1988): Introduction to System Identification: Fundamentals and Survey; International Centre for Mechanical Sciences, Application of System Identification in Engineering; Springer Verlag, S. 3 - 110.
- [64] NATKE, H. G.; JAO, J. T. P. (1988): Structural Safety Evaluation Based on System Identification; Vieweg & Sohn Verlag, Braunschweig/Wiesbaden.
- [65] NATKE, H. G. (1989): Baudynamik, Einführung in die Dynamik mit Anwendungen aus dem Bauwesen; Teubner Verlag, Stuttgart.
- [66] NATKE, H. G. (1990): Identifikation diskreter Systemmodelle; Dynamische Probleme – Modellierung und Wirklichkeit, Mitteilung des Curt-Risch-Instituts der Universität Hannover, 05. - 06. Oktober 1990, S. 251 - 269.
- [67] NATKE, H. G.; CEMPEL, C. (1997): Model-Aided Diagnosis of Mechanical Systems; Springer Verlag.
- [68] NÖDING, N. (2000): Untersuchungen des Einflusses von Geometriefehlstellen auf die Messung und Auswertung von Pfahlintegritätsprüfungen; Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig; unveröffentlicht.
- [69] PAN, SHISHENG (1988): Quality Control and Determination of Bearing Capacity of Piles from Vibration Testing; Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 25.-27. Mai 1988, Ottawa, Canada, S. 270-285.
- [70] PCB (1999): Shock and Vibration Sensor Catalog; PCB Piezotronics Inc..
- [71] PEIL, U. (1993): Baudynamik; Stahlbau Handbuch, Band 1, Teil A, 3. Auflage; Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln.
- [72] PRAKASH, S. (1981): Soil dynamics; McGraw-Hill Book Company.
- [73] PROFOS, P.; PFEIFER, T. (1992): Handbuch der industriellen Meßtechnik; 5. Auflage; Oldenbourg Verlag, München.
- [74] PLASSMANN, B. (1997): Auswertung von Integritätsmessungen mit der Finite Elemente Methode; Pfahlsymposium 1997; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 53, S. 93 - 106.

- [75] PLASSMANN, B.; KIRSCH, F.; VITTINGHOFF, T.; LÖHR, M. (1999): Implementierung infinitesimaler Elemente im ANSYS Open System und deren Anwendung bei Halbraumberechnungen in der Geotechnik; 17. CAD-FEM Users' Meeting; FEM-Technologietage; 06. - 08. Oktober 1999, Sonthofen.
- [76] PLASSMANN, B.; KIRSCH, F. (2000): Qualitätskontrolle von Pfahlgründungen mit Hilfe von dynamischen Prüfmethoden – Entwicklungen bei Messung und Auswertung; Dynamische Probleme – Modellierung und Wirklichkeit, Mitteilung des Curt-Risch-Instituts der Universität Hannover, 05. - 06. Oktober 2000, S. 121 - 142.
- [77] PLASSMANN, B. (2001): Pfahlintegritätsprüfung - Entwicklungen bei Messung und Auswertung; Pfahlsymposium 2001; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 65, S. 297 - 318.
- [78] RAUSCHE, F.; LIKINS, G. E.; HUSSEIN, M. (1988): Pile integrity by low and high strain impacts; Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 25. - 27. Mai 1988, Ottawa, Canada, S. 44 - 55.
- [79] RAUSCHE, F. (1991): Pfahlintegrität mit dem Low Strain Verfahren im Zeit- und Frequenzbereich; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 38, S. 119 - 133.
- [80] RODATZ, W. (1991): Dynamische Pfahltests; Seminar Dynamische Pfahltests 1991; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 38, S. 1 - 9.
- [81] RODATZ, W. (1995): Vorlesungsumdruck, Grundbau Bodenmechanik Unterirdisches Bauen; 9. Auflage; Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig.
- [82] RODATZ, W. (1996): Abschlußbericht über das Forschungsvorhaben Pfahlintegrität; Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig.
- [83] ROHRBACH, C. (1967): Handbuch für elektrisches Messen mechanischer Größen; VDI-Verlag, Düsseldorf.
- [84] ROSTASY, F. S. (1983): Baustoffe; Kohlhammer Verlag, Stuttgart.
- [85] RUDOLPH, D. (2000): Untersuchungen des Dämpfungseinflusses auf die Messung und Auswertung von Pfahlintegritätsprüfungen; Diplomarbeit am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig; unveröffentlicht.
- [86] SANSALONE, M. J.; STREETT, W. B. (1997): Impact-Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry; Bullbrier Press.
- [87] SCHWARZ, H. R. (1993): Numerische Mathematik; 3. Auflage; Teubner Verlag, Stuttgart.
- [88] SEITZ, J. M. (1992): Low-Strain Integritätsprüfung bei Bohrpfehlen; Bautechnik 69, Heft 10, S. 551 - 557.
- [89] SLIWINSKI, Z. J.; FLEMING, W. G. K. (1984): The integrity and performance of bored piles; Piling and Ground Treatment, Institution of Civil Engineers, London, S. 211 - 223.

- [90] SLOWIK, V.; KINK, T. (1999): Neue Möglichkeiten zur langzeitigen Dehnungsmessung im Bauwesen mittels Faser-Bragg-Gitter-Sensoren; Bautechnik 76, Heft 10, S. 884 -887.
- [91] SMITH, E. A. L. (1960): Pile-driving analysis by the wave equation; Journal of the soil mechanics and foundations division; Proceedings of the American Society of Civil Engineers, S. 35-61.
- [92] STAIN, R. T.; WILLIAMS, H. T.(1991): Interpretation of Sonic Coring results: A research project, 4th International DFI Conference, 07. - 12. April 1991, Balkema, Rotterdam, S. 633 - 640.
- [93] STARKE, W. F.; JANES, M. C. (1988): Accuracy and reliability of low strain integrity testing; Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 25. - 27. Mai 1988, Ottawa, Canada, S. 19 - 32.
- [94] STAVROULAKIS, G. E.; ANTES, H. (1998): Neural crack identification in steady state elastodynamics; Computer methods in applied mechanics and engineering 165, S. 129 - 146.
- [95] SZABO, I. (1966): Einführung in die Technische Mechanik; Siebente Auflage; Springer Verlag.
- [96] TESTPOINT (1995): TestPoint User's Guide, Techniques & References; 5. Auflage; Capital Equipment Corporation (CEC), Massachusetts, USA.
- [97] THORBURN, S.; THORBURN, J. Q. (1977): Review of problems associated with the construction of cast-in-place concrete piles; Doe and Ciria Piling Development Group; Report PG2; London.
- [98] TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. (1970): Theory of Elasticity; Third Edition; McGraw-Hill Book Company.
- [99] ULRICH, G. (1989): Transportschäden an Korrosionsschutzbeschichtungen; Hansa, Jg. 126, Nr. 11/12, S. 833 - 834.
- [100] VAN GINNEKEN, G.; MIDDENDORP, P.; VAN FOEKEN, R.; PLUIMGRAAF, D. (2001): New developments in applying pile testing methodologies in the Netherlands; Pfahlsymposium 2001; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 65, S. 319 - 348.
- [101] WERNER, H. (1983): Kombinierte Steuersignale für reflexionsseismische Messungen nach dem Vibroseis-Verfahren; Forschungsbereich T83-211, Prakla-Seismos GmbH Hannover.
- [102] WIENHOLZ, B. (1995): Integritätsmessungen; Pfahlsymposium 1995; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 48, S. 155 - 162.
- [103] WIENHOLZ, B. (1999): Tragfähigkeit von Verdrängungspfählen im Sand in Abhängigkeit von der Einbringung; Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 57.

- [104] WOOD, W. L. (1990): Practical time-stepping Schemes; Clarendon Press, Oxford.
- [105] ZHAO ZUE-MENG; LI DA-XIAN (1988): Non-destructive testing of piles by hydro-electric effect method; Third International Conference on the Application of Stress-Wave Theory to Piles, 25. - 27. Mai 1988, Ottawa, Canada, S. 135 - 141.
- [106] ZIENKIEWICZ, O. C.; TAYLOR, R. L. (1989): The finite element method; 4. Edition; McGraw-Hill Book Company.

11 Synopsis

11.1 Abstract

The low-strain integrity method is investigated to gain improved results in terms of the location and identification of structural defects in piles. A variety of measurement gauges and impact hammers are examined in particular to include the high frequency content of the impact vibrations. The development of analysis algorithms is a central part of the research in order to widen the limits of application. The current method of analysis consists solely of the visual interpretation of the velocity signal gained from the measured acceleration signal. Analysis algorithms are necessary to increase the objectivity of the results. Those algorithms based on the physical behaviour of the stress wave propagation also include additional information from site investigation and pile installation.

11.2 Introduction

Due to the rising number of highly loaded piled foundations quality assurance becomes more and more important. This stands not only for the quality assurance of the construction processes and the final product but also for the quality assurance of the testing procedures themselves. The current developments in the execution and analysis of dynamic low-strain integrity pile tests are described.

At the Institute for Soil Mechanics and Foundation Engineering of the Technical University of Braunschweig, Germany (IGB· TUBS) extensive research in the improvement of testing procedures and analysis of low-strain integrity tests was performed. Large scale model tests and numerical simulations were carried out to gain knowledge of the influence of the impact on the stress wave propagation and therefore on the analysis opportunities. The stress wave propagation was investigated using extended instrumentation. Therefore special transducers based on strain gauges were developed and installed into large scale model piles as described below.

11.3 Developments in low-strain integrity testing

To judge the integrity of piles a variety of methods is used. Below the low-strain integrity test method, based on the measurement of the stress wave propagation in the pile induced by the impact of a hammer stroke, is investigated. Reflections of the induced stress wave occur not only at the pile tip but also along the pile axis at locations of changes of the pile impedance (figure 1). The impedance is a function of the cross sectional area, the modulus of elasticity, the wave speed in the pile material and of the soil damping. Changes of the pile impedance can therefore be caused by changes of the cross sectional area or the material properties. The generated wave reflections are localised in the measured signal and allow for statements concerning pile length and the location of changes of pile impedance.

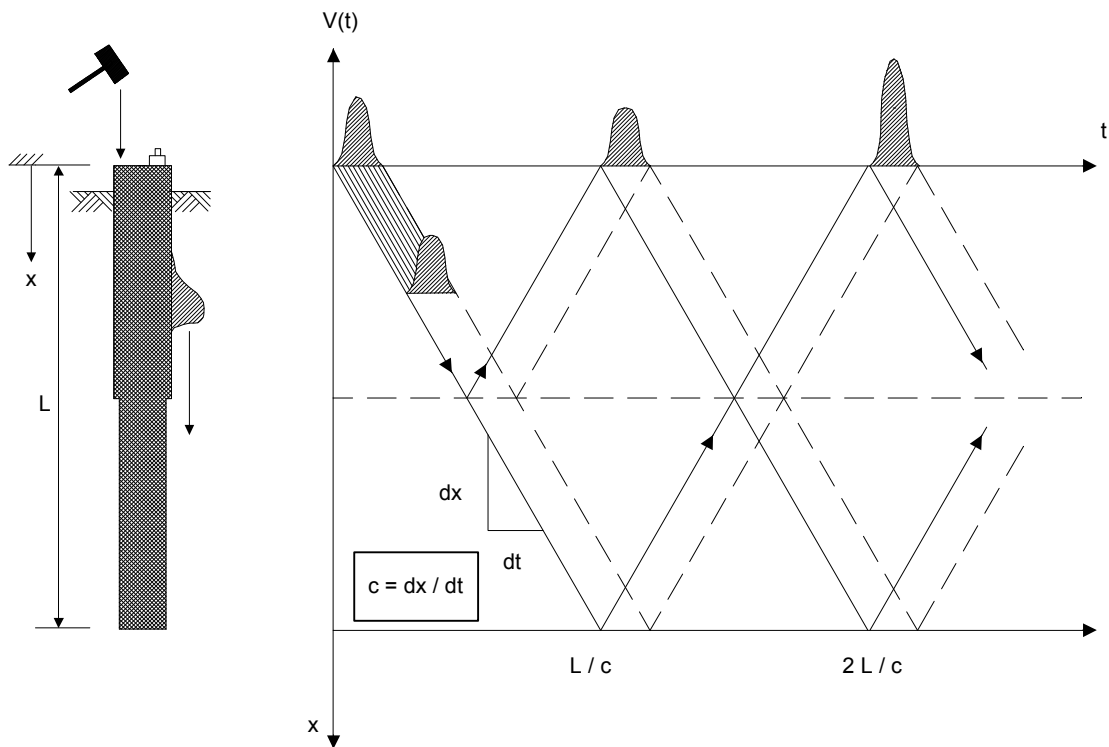


Figure 1. Velocity – time signal of a low-strain integrity test

11.3.1 Equipment requirements

The accuracy of the results of the low-strain integrity test method is highly dependent on the measurement equipment. In general it consists of:

- amplifier
- analog digital converter
- control and memory unit
- accelerometer
- impact hammer

The requirements and interdependences of all components are investigated and the possibilities of measuring the high frequency content of the hammer impact are examined.

The choice of a suitable accelerometer and its fixing to the pile surface is of the same importance as the influence of the impact hammer. Whether the total frequency range is transmitted to the gauges and whether it is covered by their measurement range is dependent on the efficiency of the accelerometer fixing to the pile surface. The resulting frequency resolution governs the capabilities of defect resolution along the pile provided that the impact frequency is sufficiently high.

Measurements on model piles show the transmitted frequency content depending on the coupling of accelerometer and pile surface (figure 2). The frequency content is increasing with growing rigidity of the connection.

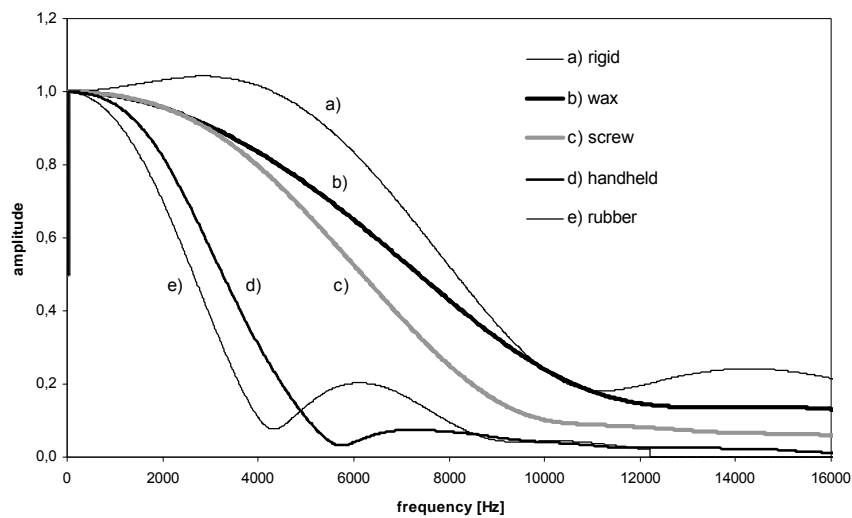


Figure 2. Frequency content of different couplings

The nature of the impact is an important factor for the quality of the test results. Therefore the impact has to be adjusted in accordance to the measurement duty, taking into account the length determination and the best possible resolution of defects.

In contrast to harmonic excitation the impact contains no discrete but a continuous frequency response with a limit frequency as an upper bound for the frequency content. From the limit frequency f_{limit} and the existing wave speed c the limit wave length is calculated: $\lambda_{\text{limit}} = c/f_{\text{limit}}$. Laboratory measurements show the relationship between limit wave length and defect resolution. In addition to the investigation of different defect shapes different impact types are applied. Figure 3 shows the time and frequency domain of the impact of two hammers with different hardness.

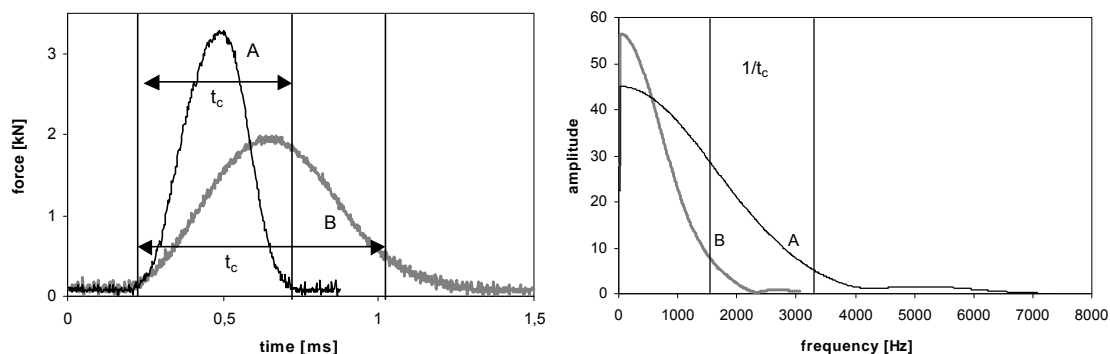


Figure 3. Different impact hardness

Apart from the required defect resolution the optimum impact time is limited by the geometry of the pile. The upper bound is defined as a function of the pile length and the lower bound of its diameter. When the frequency content of the impact becomes too high, disturbances due to transverse vibrations occur.

11.3.2 Extended instrumentation – large scale model tests

Usually the test is performed by applying an accelerometer at the pile top surface. Quality and accuracy of the results can be improved by the use of extended instrumentation. During the large scale model tests special strain gauges along the pile axis were used to increase the information content of the result. The gauges are specially developed non recoverable high frequency strain gauges (figure 4). To be of practical use the gauges are relatively cheap and easy to handle. They have to be installed before pile concreting. In each of several test piles three strain gauges were installed. The results of the test pile investigations are shown in the following sections.

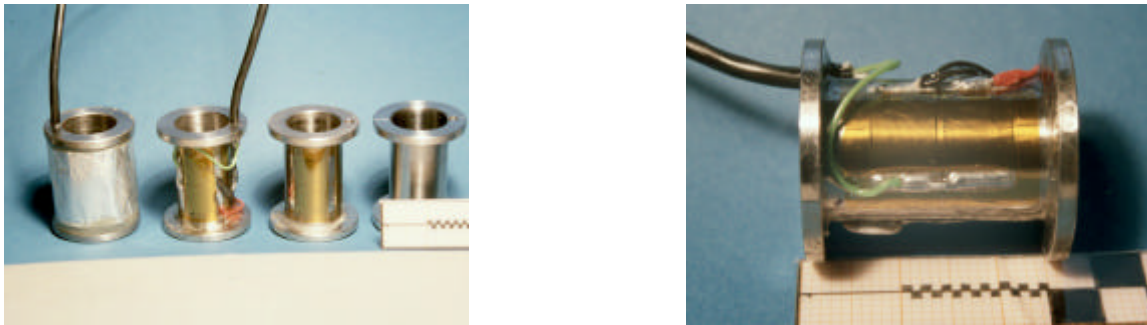


Figure 4. High frequency strain gauges

11.3.3 Defect resolution – large scale model tests

Large scale model tests on reinforced concrete piles were carried out in order to investigate the maximum defect resolution of low-strain dynamic pile tests. Different shapes and magnitudes of geometrical defects were applied to the model piles (figure 5). The tests were performed on piles with and without the embedment in the surrounding soil. As already described the extended instrumentation was used and the influence of different impact hammers was examined.

The analysis of the measurement signals of the accelerometer and the strain gauges is focussed on the determination of the position of the defect along the pile axis, its depth, i.e. the magnitude of cross section reduction, and the width of the applied defect. Furthermore the resulting wave speed is determined in each segment of the pile by the use of additional strain gauges. Figure 6 shows an example of the measurement signals.

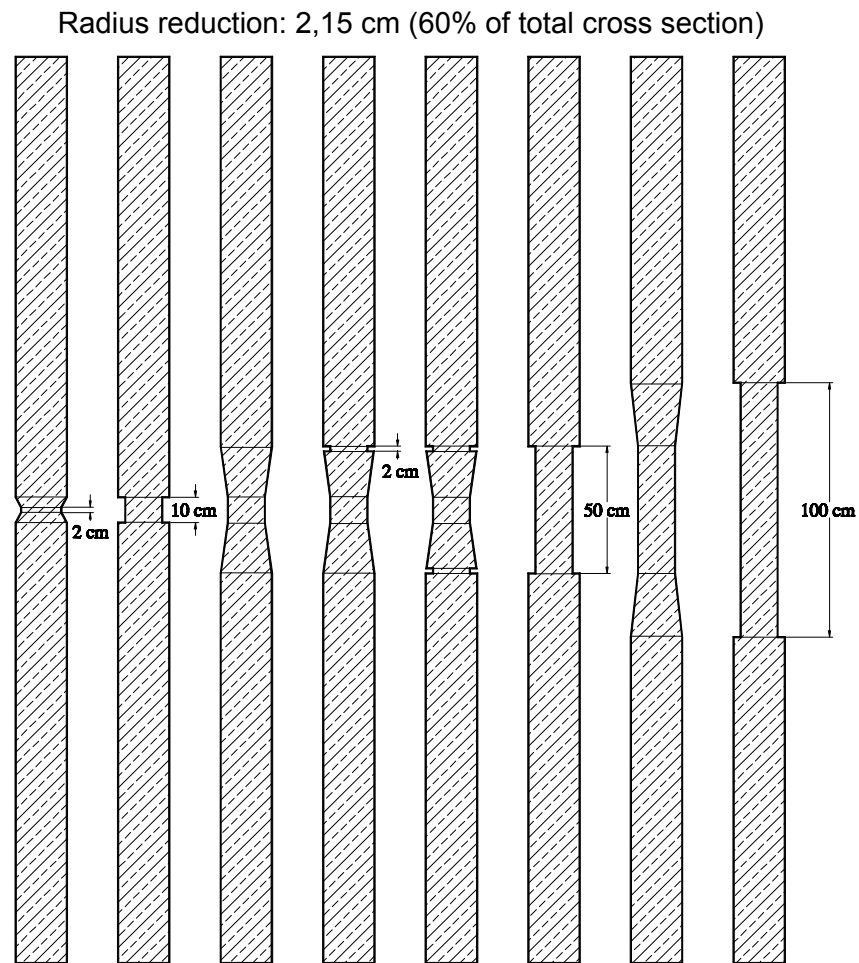


Figure 5. Defect shapes at model pile 3

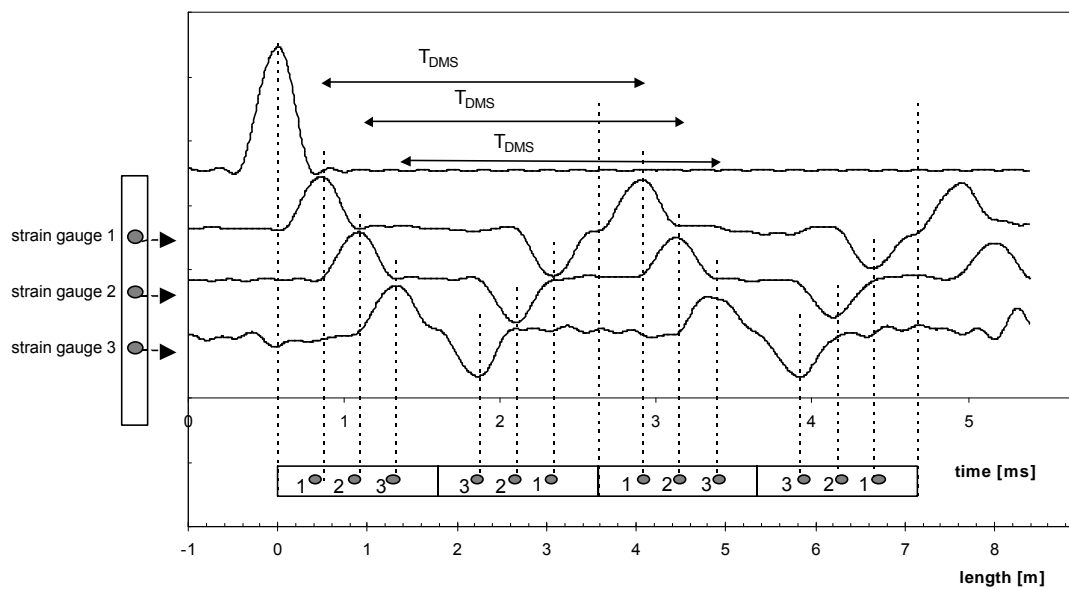


Figure 6. Signals of tests with the extended instrumentation

The accuracy of the determination of the defect's position and magnitude is highly dependent on the impact frequency content. Figure 7 compares measured and existing defect widths for the excitation by impact hammer B.

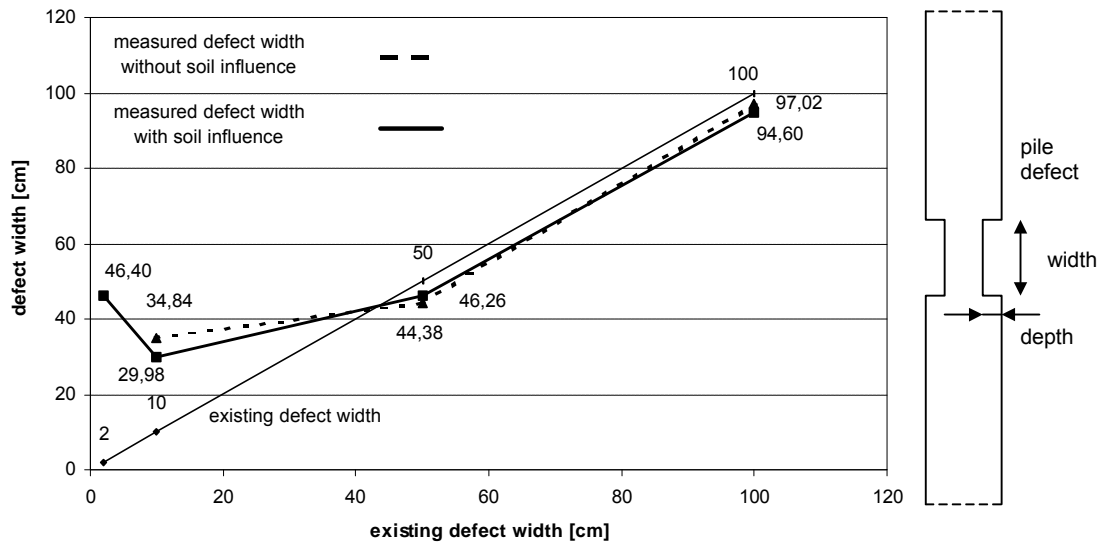


Figure 7. Defect width of model pile 1, impact hammer B

From a certain defect width onwards the difference between existing and measured defect width decreases. Figure 8 shows the measurement accuracy as a function of the impact and the existing defect width.

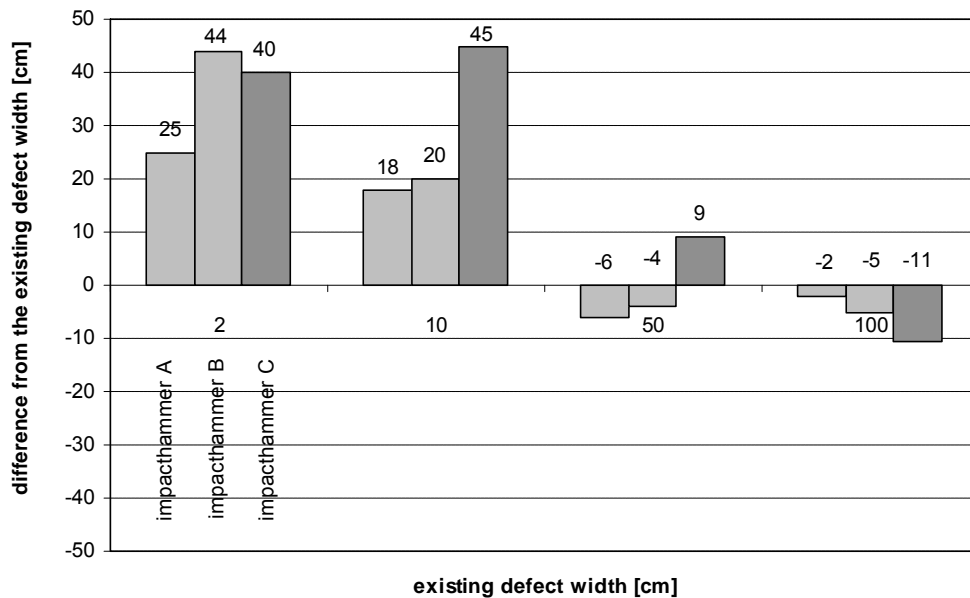


Figure 8. Measurement accuracy as a function of the impact type

The connection of defect resolution and impact frequency content is determined by the investigations. The limit wave length is calculated from the limit frequency $f_{\text{limit}} = 1/t_{\text{impact}}$. From the investigations a critical defect width l_{defect} can be found as:

$$l_{\text{defect}} < \lambda_{\text{limit}} / 4$$

At smaller defect widths or lower frequency contents the maxima of the wave reflections are shifted and the exact determination of the defect width is not possible. With rising overlapping of wave reflections the determination of the defect itself becomes more difficult and finally impossible.

Defects influence the measurement signal due to reflections of the stress wave. In addition the laboratory tests showed a reduction of the overall wave speed in the presence of pile defects. The magnitude of the wave speed reduction is dependent on the defect width and depth (figure 9).

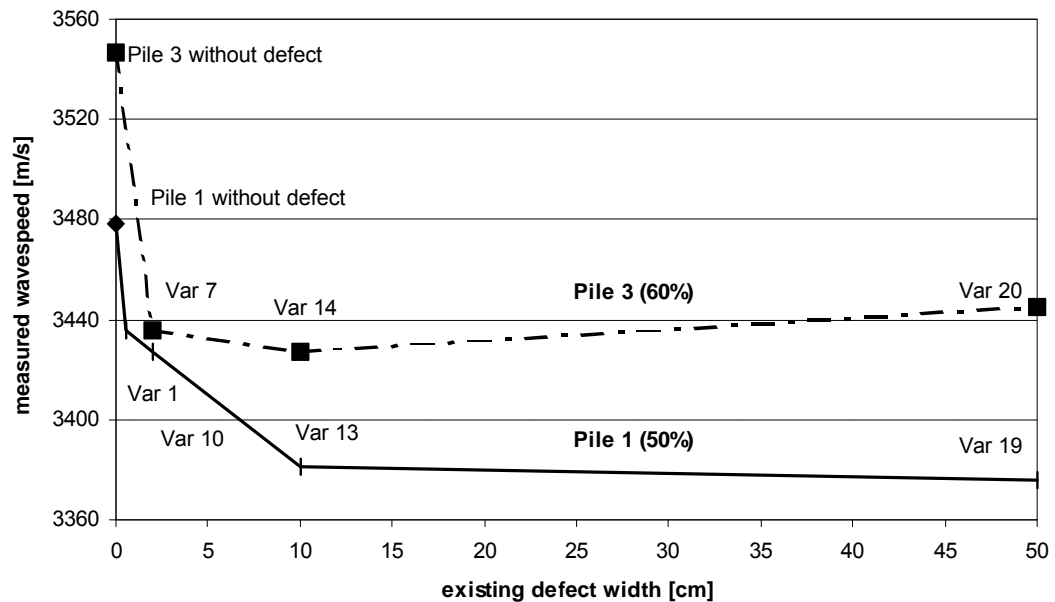


Figure 9. Wave speed reduction with increasing defect width

The observed overall wave speed reduction is caused by the local reduction of the wave speed consisting of different wave portions (compression and shear wave) in the area of the geometry change [45]. Therefore the overall wave speed cannot be determined accurately. To gain more information about the relationship of wave speed reduction and defect geometry extensive numerical simulations are performed.

11.3.4 Influence of surrounding soil

Apart from pile geometry and material the interaction of the pile with the surrounding soil has influence on the stress wave propagation. Below the soil influence is determined by in-situ tests on piles without defects. From existing ground investigation consisting of SPT, CPT and borings a damping profile is established and used for the numerical simulation of the stress wave propagation. The signal matching of measured and computed velocity at the pile top is performed by the variation of the damping parameters. The analysis is done by a FEM model in which all essential effects of the soil influence are covered. The model includes dynamic soil resistance by viscous damping along the pile axis [74].

The following example illustrates the influence of the surrounding soil on the measurement signal and the results of the simulation. A 20,5 m long, prestressed concrete pile is tested before and after driving in sand and boulder clay. Figures 10 and 11 show the velocity signal and the results of the FEM-simulation. Information about the in-situ ground conditions are necessary in order to evaluate the measured wave reflections.

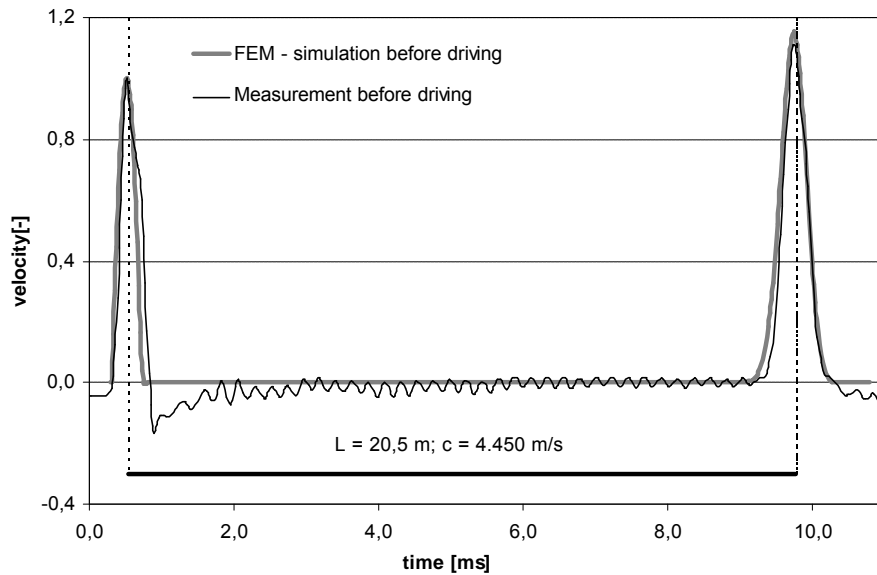


Figure 10. Prestressed concrete pile before driving

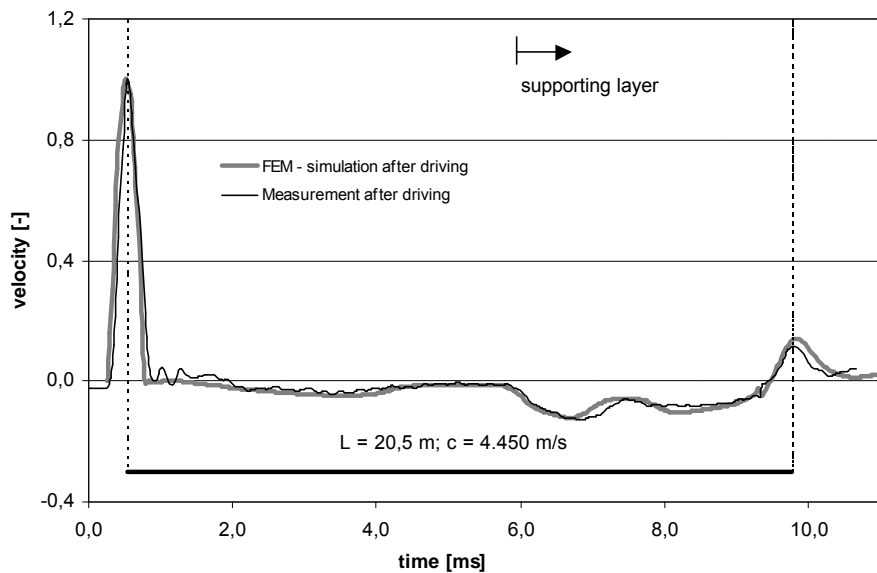


Figure 11. Prestressed concrete pile after driving

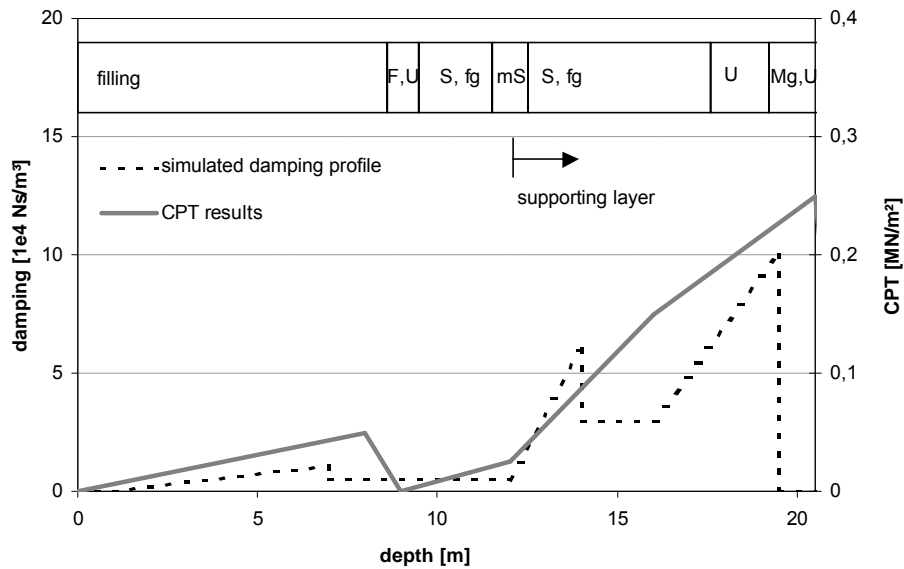


Figure 12. CPT results near pile location and simulated damping profile

Figure 12 shows CPT results near the pile location. After approximately 8 m of filling a 9 m thick sand layer followed by boulder clay is encountered by borings. It can be seen that the reflections in the low-strain integrity test signal coincide with the presence of stiffer material in the ground. From the field measurements and the numerical simulations the effect of the soil on the signal becomes obvious. On the one hand the stiffer material causes an impedance increase. On the other hand the soil damping results in a reduced amplitude of the pile toe reflection. The investigations show, that a significant soil influence can be simulated by the FEM model.

11.3.5 Investigation for the analysis of integrity tests

The prospects and limits of the signal interpretation in the frequency domain are investigated. In comparison to the analysis of the time domain, there is no further improvement in the interpretation of the pile geometry.

System identification by the use of the measured signal is investigated in addition to the direct simulation of low-strain integrity tests by numerical analysis. The use of correlation algorithms is investigated to allow for the automated system identification. The findings of the research on the damping behaviour are included in the identification process. A parametric identification of a forward model is developed. In these algorithms the information from site investigation as well as from pile installation is taken into account. By additional use of correlation algorithms and the least square method for error estimation a sufficiently accurate identification is possible. Nevertheless further investigation for an automated identification is necessary. Figure 13 shows the identification of a model pile as an example.

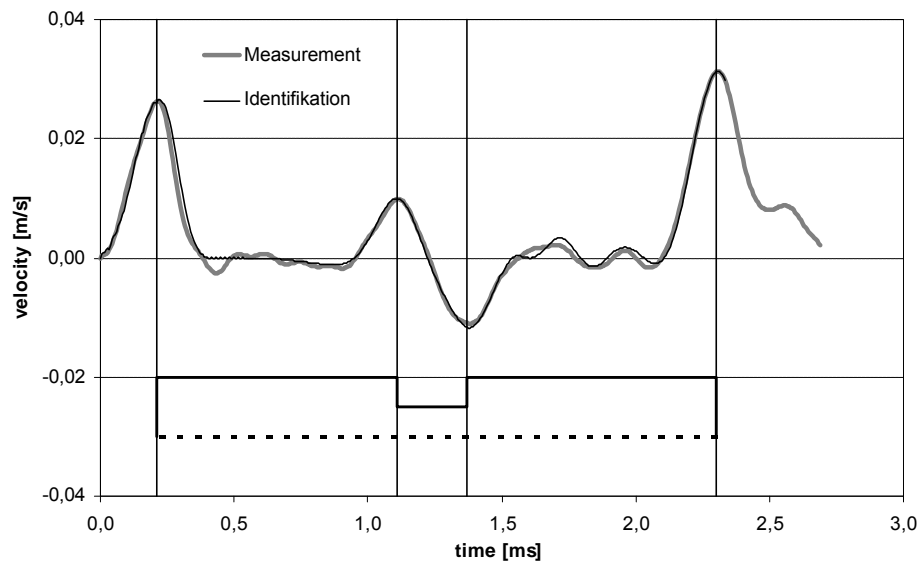


Figure 13. Measured and identified velocity signal of a model pile

11.4 Further objectives

A further point of interest is the application of low-strain integrity tests to other structures of specialised ground engineering such as jet-grouting columns, deep soil mixing columns, bored pile walls or diaphragm walls. In some applications not only the structural integrity but the tight contact and the quantity of embedment is of special interest, for example behind the tunnel facing or below shallow foundations. Here the low-strain integrity test is comparable to the so called impact echo method. At numerous in-situ measurements the IGB· TUBS was able to gain knowledge on the application of the low-strain testing method on those structures.

11.5 Summary

The described investigation reveals new aspects in the field of low-strain integrity testing. The resolution of pile defects as a function of impact type and measurement equipment as well as the influence of the surrounding soil on the signal are quantified. Extended measurement allows the optimisation of the testing process and shows the relationship of pile defects with changes of the local wave speed. Analysis algorithms and numerical simulations are developed and will allow for the automated system identification by the use of the measured signal. Information from prior site investigation and pile installation are included in these analysis algorithms.